

Veleučilište u Karlovcu

Strojarski odjel

Specijalistički diplomski studij strojarstva

# **DIPLOMSKI RAD**

Luka Špiljak

KARLOVAC, 2018.

Veleučilište u Karlovcu

Strojarski odjel

Specijalistički diplomski studij strojarstva

## **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Dr.sc. Tanja Tomić

Student:

Luka Špiljak

KARLOVAC, 2018.

## **Izjava**

Izjavljujem pod materijalnom i moralnom odgovornošću da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Tanji Tomić na ukazanoj pomoći i savjetima prilikom izrade ovog diplomskog rada.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Trg J.J.Strossmayera 9

HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 57



## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Specijalistički studij: STROJARSTVO

Usmjerenje: Strojarske konstrukcije

Karlovac, 03.09.2018.

### **ZADATAK DIPLOMSKOG RADA**

Student: Luka Špiljak

Matični broj: 0123416021

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Tehnologija zavarivanja spremnika od nehrđajućeg čelika

Naslov rada na engleskom jeziku: Welding technology stainless steel vessel

Opis zadatka:

- opisati postupak TIG zavarivanja,
- opisati vrstu i primjenu nehrđajućeg čelika
- u eksperimentalnom dijelu opisati proces proizvodnje spremnika od nehrđajućeg čelika
- usporediti postupke ručno TIG i automatizirano plazma zavarivanje

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

03.09.2018.

29.10.2018.

07.11.2018.

Mentor:

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

Dr.sc. Tanja Tomić

Marijan Brozović, dipl.ing.

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. Zavarivanje TIG postupkom .....	2
2.1 Uvod.....	2
2.2 Osnove karakteristike postupka .....	2
2.3 Izvori struje za TIG zavarivanje .....	4
2.4 Zaštitni plinovi .....	7
2.5 Gorionici za TIG zavarivanje .....	10
2.6 Volframova elektroda .....	11
3. Nehrđajući čelici .....	13
3.1 Definicija nehrđajućih čelika .....	13
3.2 Podjela nehrđajućih čelika .....	15
3.2.1. Feritni nehrđajući čelici .....	16
3.2.2 Austenitni nehrđajući čelici .....	19
3.2.3 Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici .....	25
3.2.4 Martenzitni nehrđajući čelici .....	29
4. Eksperimentalni rad .....	34
4.1 Opis eksperimenta .....	34
4.2 Odabir materijala .....	35
4.3 Tehnologija zavarivanja .....	36
4.3.1 Općenito .....	36
4.3.2 Osnovni materijal .....	36
4.3.3 Dodatni materijal za zavarivanje .....	36
4.3.4 Postupci zavarivanja .....	36
4.3.5 Zavarivači .....	37
4.3.6 Uređaji i oprema za zavarivanje .....	37
4.3.7 Priprema spoja za zavarivanje .....	37

4.3.8 WPS lista .....	37
4.3.9 Zavarivanje .....	39
4.3.10 Popravci zavarenog spoja .....	39
4.4 Obrada podnica .....	39
4.5 Izrada unutarnjeg plašta .....	40
4.6 Zavarivanje unutarnjeg plašta .....	41
4.6.1 Plazma zavarivanje .....	41
4.6.2 Parametri za plazma zavarivanje .....	44
4.6.3 Zaštitni plin R1-ArH-5 .....	46
4.6.4 Korijeni zaštitni plin N5-NH-10 .....	46
4.6.5 Plazmeni plin R1-ArH-7 .....	46
4.6.6 Dodatni materijal za plazma zavarivanje .....	46
4.7 Spajanje plašta podnicama .....	47
4.7.1 Parametri TIG zavarivanje podnica i plašta .....	47
4.8 Zavarivanje priključaka .....	50
4.9 Kontrola zavarenih spojeva .....	50
4.9.1 Vizualna kontrola zavarenih spojeva .....	50
4.9.2 Nerazorna metoda ispitivanja materijala .....	51
4.10. Tlačna proba .....	53
5. Zaključak .....	55
6. Literatura .....	56

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz TIG postupka [13] .....	3
Slika 3. a) Kontrola balansa izmjenične struje, b) Kontrola frekvencije izmjenične struje, c) Nezavisna kontrola jakosti struje [4] .....	6
Slika 4. TIG argon [14].....	7
Slika 5. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [4]8	
Slika 6. TIG argon/helij [14] .....	9
Slika 7. TIG argon/vodik [14] .....	10
Slika 8. Pravilno i nepravilno brušenje elektrode [5] .....	12
Slika 9. Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku . [2] .....	13
Slika 10. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3].....	16
Slika 11. Shematski prikaz toplinske obradbe feritnih čelika [3].....	18
Slika 12. Mikrostruktura austenitnog čelika AISI 316 [3].....	20
Slika 13. Shematski prikaz toplinske obradbe nestabiliziranog (a) i titanom stabiliziranog (b) austenitnog nehrđajućeg čelika [3].....	21
Slika 14. Utjecaj sadržaja ugljika na početak izlučivanja karbida (a) i utjecaj sadržaja ugljika na granicu razvlačenja Cr-Ni i Cr-Ni-Mo čelika (b) [3].....	24
Slika 15. Kvazibinarni presjek ternarnog dijagrama stanja Fe-Cr-Ni za 60% Fe [3].....	26
Slika 16. Promjena udjela austenita i ferita s temperaturom zagrijavanja dupleks čelika (a) i ovisnost mehaničkih svojstava dupleks čelika X2CrNiMoN 22 5 o temperaturi gašenja [3] .....	27
Slika 17. Usporedba ponašanja dupleks i austenitnog čelika u ovisnosti o sadržaju klorida i temperaturi (a) te sulfidnoj napetosnoj koroziji (b) [3] .....	28
Slika 18. Shematski prikaz dijagrama žarenja martenzitnih čelika [3].....	30
Slika 19. Pseudobinarni dijagram Fe-Fe <sub>3</sub> C kod sadržaja kroma 13% [3].....	30
Slika 20. Shematski prikaz podjele niskougljičnih martenzitnih čelika [3] .....	32
Slika 21. Shematski prikaz TTA dijagrama (a) te područja mikrostruktura popuštanja i gašenja (b) mekomartenzitnog čelika s 14% Cr, 5% Ni i 1,5% Mo [3] .....	33
Slika 22. Pogon tvrtke Tomo Varga d.o.o. [14] .....	34
Slika 23. Obrada podnica .....	40
Slika 24. Valjci za savijanje limova .....	41
Slika 25. Automatizirani sustav za automatsko uzdužno zavarivanje u pogonu tvrtke Tomo Varga d.o.o. ....	42
Slika 26. Usporedba širine električnog luka .....	43
Slika 27. Usporedba duljine el. luka (10A) .....	43
Slika 28. Plazma zavarivanje s prenesenim lukom [12].....	44
Slika 29. Priprema plašta za izradu uzdužnog zavara .....	45
Slika 30. Oblik spoja [14] .....	45
Slika 31. Spoj plašta i podnice .....	47
Slika 32. Oblik spoja [14] .....	48
Slika 33. Izrada korijenskog zavara .....	48
Slika 34. Zavar popuna žlijeba .....	49
Slika 35. Pokrivni zavar .....	49
Slika 36. Zavarivanje priključaka .....	50

Slika 37. Shematski prikaz kontrole penetrantima .....	52
Slika 38. Priprema spremnika za tlačnu probu .....	53
Slika 39. Prikaz manometra na totalnom ispustu .....	54



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu.....	5
Tablica 2. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova...	9
Tablica 3. Označavanje volframovih elektroda .....	12
Tablica 4. Osnovne skupine nehrđajućih čelika.....	16
Tablica 5. Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika .....	17
Tablica 6. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika s <10% delta ferita u mikrostrukturi ..	23
Tablica 7. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika bez δ-ferita u mikrostrukturi.....	24
Tablica 8. Primjeri niskougličnih austenitnih nehrđajućih čelika.....	25
Tablica 9. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika legiranih dušikom .....	25
Tablica 10. Svojstva i primjena martenzitnih nehrđajućih čelika .....	31
Tablica 11. Primjeri temperature gašenja i popuštanja mekomartenzitnih čelika.....	33
Tablica 12. Parametri plazma zavarivanja .....	45
Tablica 13. Tablica parametra TIG zavarivanja .....	48

## POPIS KRATICA

### Kratika

### Opis

<i>AC</i>	Izmjenična struja (engl. Alternating current)
<i>AISI</i>	Američki institut za željezo i čelik (engl. American Iron and Steel Institute)
<i>ASME</i>	Američko društvo inženjera strojarstva (engl. American Society of Mechanical Engineers)
<i>DC</i>	Istosmjerna struja (engl. Direct current)
<i>DCEN</i>	Istosmjerna struja s elektrodom na negativnom polu (engl. Direct Current Electrode Negative)
<i>DCEP</i>	Istosmjerna struja s elektrodom na pozitivnom polu (engl. Direct Current Electrode Positive)
<i>ELA</i>	Čelici sa niskim udjelom „dodataka“ (eng. Extra Low Additions).
<i>ELC</i>	Extra Low Carbon
<i>GTAW</i>	Gas Tungsten Arc Welding
<i>LC</i>	Low Carbon
<i>NDT</i>	Ispitivanje materijala bez razaranja (engl. Non-destructive testing)
<i>PQR</i>	Procedure Qualification Record
<i>REL</i>	Ručno elektrolučno zavarivanje
<i>TIG</i>	Tungsten Inert Gas
<i>TTA</i>	Time-Temperature-Austenitizing
<i>WIG</i>	Wolfram Inert Gas Welding)
<i>WPS</i>	Uputa za zavarivanje (engl. Welding Procedure Specification)

## **SAŽETAK**

Tema ovog diplomskog rada je implementacija opreme u ovom slučaju tlačnog spremnika za proizvodnju pića sa naglaskom na zavarivanje nehrđajućeg čelika. Najprije je detaljno pojašnjen postupak TIG zavarivanja.

Teorijski dio rada baziran je na opisu nehrđajućeg čelika. Opisana je podjela prema vrsti te primjena nehrđajućeg čelika u struci.

U ekperimentalnom dijelu opisan je proces proizvodnje spremnika od nehrđajućeg čelika od početne faze do završne faze kada je spremnik spreman za isporuku prema naručitelju. Cilj rada je opisati proces kako se odvija proizvodnja proizvoda sa naglaskom na postupke zavarivanja koji su korišteni u proizvodnji.

Ključne riječi: TIG postupak zavarivanja, nehrđajući čelik, spremnik

## **SUMMARY**

The topic of this graduate thesis is the implementation of the equipment, in this case of a pressure vessel for the production of beverages with an emphasis on welding stainless steel. First, the TIG welding procedure is explained in detail.

The theoretical part of the work is based on the description of stainless steel. The breakdown by type and application of stainless steel in the profession is described.

The experimental part describes the process of producing a stainless steel vessel from the initial phase to the final stage when the vessel is ready for delivery to the customer. The aim of the paper is to describe the process of production of vessel with emphasis on welding processes used in production.

Key words: TIG welding procedure, stainless steel, vessel

## 1. UVOD

Zbog korozijske postojanosti za razliku od običnog čelika koji brzo oksidira na zraku u današnje vrijeme gotovo svaki stroj ili postrojenje se proizvodi od nehrđajućeg čelika. Ovisno o mediju koji se koristi u proizvodnji hrane i pića odabire se vrsta nehrđajućeg čelika. Podjela tih čelika koja se koristi u literaturi je vrlo raznolika. Najčešća je prema strukturi kristalne rešetke, ta podjela može biti kroz glavne grupe čelika i to: feritna, austenitna, martenzitna i feritno-austenitna struktura.

Značajno mjesto u razvoju metalne industrije zauzima način spajanja metala i njihovih legura (materijala). Od prvih spajanja materijala, u nekoj vezi, do danas, došlo je do velikog razvoja postupaka i tehnologija, a naravno uočene su i bitne razlike u razvoju pojedinih tehnologija. Razvojem metalne industrije došlo je do čitavog niza novih načina dobijanja metala, obrade, spajanja kao i upotrebe metala. Zavarivanje spada u moderniji način spajanja materijala.

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj (zavareni spoj bez grešaka sa zahtjevanim mehaničkim i ostalim svojstvima).

Za proizvodnju opreme koja se koristi u prehrambenoj industriji najčešće se koristi postupak TIG zavarivanja. Atmosferski spremnici, tlačni spremnici, transporter i ostala oprema koja se proizvodi od nehrđajućeg čelika u prehrambenoj industriji najčešće su od tanjeg materijala (1,5 do 6 mm), stoga se TIG postupak najviše primjenjuje u svrhu zavarivanja.

## 2. Zavarivanje TIG postupkom

### 2.1 Uvod

Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina – u daljnjem tekstu skraćeno TIG postupak zavarivanja (TIG-eng. Tungsten Inert Gas, WIG-njem. Wolfram Inert Gas, GTAW-Gas Tungsten Arc Welding) potječe iz 1941.g. kada se počeo razvijati za potrebe avioindustrije odnosno za zavarivanje lakih metala (aluminija i magnezija). Nakon toga se korištenje proširilo na izradu posuda za kemijsku i procesnu industriju od nehrđajućih čelika aluminija i bakra. [1]

Tijekom vremena uz poboljšanja vezana za izvore za zavarivanje, zaštitne plinove, netaljive elektrode, gorionike i ostalo TIG postupak zavarivanja se razvijao i uspješno se primjenjuje do današnjih dana. [1]

Primjena TIG postupka raširena je u zavarivanju aluminija i Al-legura, nehrđajućih čelika, bakra i Cu-legura, magnezija i Mg-legura te naravno za zavarivanje konstrukcijskih čelika. Koristi se za proizvodna zavarivanja i reparaturna zavarivanja. [1]

### 2.2 Osnove karakteristike postupka

Elektrolučno zavarivanje elektrodom u zaštiti inertnog plina (TIG postupak) je postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk (koji daje potrebnu energiju za zavarivanje) stvara između netaljive elektrode (volframove) i materijala koji se zavaruje. Dodatni materijal najčešće u obliku šipke ili žice dodaje se u prednj rub kupke rastaljenog metala. Inertni plin (uglavnom argon, helij) stvara zaštitnu atmosferu koja sprečava kontaminaciju volframove elektrode i rastaljene kupke materijala. TIG postupak je precizan jer se elektroda ne troši tokom zavarivanja (može se dobro kontrolirati proces), a dodatni materijal se po potrebi dodaje u kupku rastaljenog materijala. [1]

TIG postupak može biti:

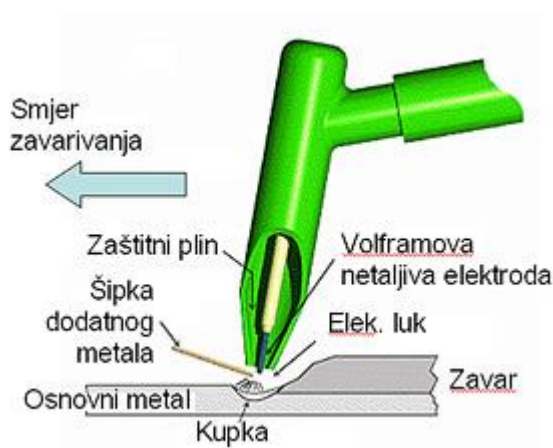
- ručni,
- poluautomatski (sa dodavanjem žice),
- automatski (npr. orbitalno zavarivanje).

Prednosti TIG zavarivanja su:

- primjenjiv za zavarivanje svih materijala,
- nema rasprskavanja kapljica,
- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- visoka kvaliteta zavora,
- nema troske, dima i isparavanja,
- raspon debljina 1-6 mm,
- brzina dodavanja dodatnog materijala je nezavisna o energiji električnog luka
- mogućnost automatizacije. [1]

Nedostaci:

- neekonomičnost za veće debljine (mala količina nataljenog materijala),
- otežan rad na otvorenom,
- kvalitetna priprema spoja (geometrija, odmašćivanje),
- čistoća površine,
- utjecaj ljudskog faktora-zavarivač,
- cijena plina-ako nisu optimalizirani parametri. [1]



Slika 1. Prikaz TIG postupka [13]

## 2.3 Izvori struje za TIG zavarivanje

Izvor struje ima padajuću karakteristiku kao kod REL postupka zavarivanja. Zbog toga većina novih strojeva ima mogućnost TIG i REL zavarivanja. [1]

Izvori struje za TIG zavarivanje mogu biti:

- za standardno TIG zavarivanje,
- za impulsno TIG zavarivanje. [1]

Prednosti impulsnog zavarivanja su :

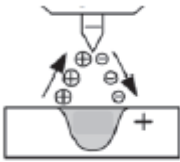
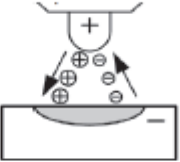
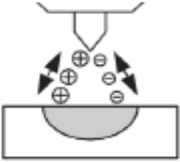
- stabilniji električni luk (ako se dobro odrede parametri),
- precizna kontrola penetracije smanjenje veličine taline zavara smanjenje unosa, topline u radni komad a time i smanjenje deformacija. [1]

Uspostavljanje električnog luka:

- dodirivanjem volframove elektrode s radnim komadom tzv. "kresanje" (rijetko se koristi – mogućnost oštećivanja volframove elektrode i kontaminacija radnog komada),
- uz pomoć visokofrekventnog generatora (VF generator) – koji služi za uspostavljanje električnog luka bez dodira vrha volframove elektrode sa radnim komadom (DC i AC ) te za održavanje stabilnosti električnog luka kod zavarivanja izmjeničnom strujom AC). [1]



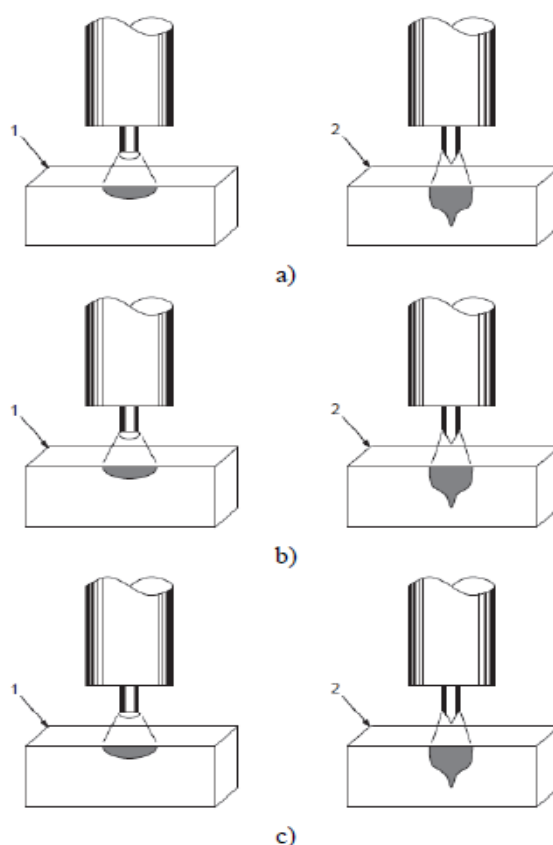
Tablica 1. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [4]

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet	-	+	
			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA (pola ciklusa)
Raspodjela topline	1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu	2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu	1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu
Penetracija	uska, duboka	plitka, široka	srednje široka srednje duboka
Kapacitet elektrode	odličan npr: Ø3,2/400A	loš npr: Ø6,4/120A	dobar npr: Ø3,2/255A

Zavarivanje TIG postupkom istosmjernom strujom s elektrodom na negativnom polu (istosmjerna struja je vrsta električne struje gdje ne dolazi do promjene smjera toka elektrona u jedinici vremena) je najčešća kombinacija struje/polariteta kod primjene TIG postupka (DCEN – Direct Current Electrode Negative). Elektroni se kreću s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal, ubrzavajući kroz električni luk, a pozitivni elektroni imaju suprotan smjer. Pri tome, količina kinetičke energije elektrona značajno je veća od one iona pa dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada, a manjeg vrha elektrode (približni odnos toplinskog opterećenja: 1/3 na elektrodi, 2/3 na radnom komadu). Zbog toga ovaj način TIG zavarivanja omogućuje rad sa manjim promjerima elektroda tj. rad s velikim strujama, a vrh elektrode može biti zašiljen što daje stabilnost električnom luku. Ovaj način zavarivanja daje dobru penetraciju. [4]

Kod zavarivanja TIG postupkom istosmjernom strujom gdje je elektroda na pozitivnom polu (DCEP-Direct Current Electrode Positive) smjer elektrona je suprotan pa je time i raspodjela topline drugačija – dolazi do velikog toplinskog opterećenja elektrode. Stoga, ovaj način zavarivanja je moguć kod manjih struja zavarivanja uz primjenu netaljivih elektroda većeg promjera. Također, u odnosu na prethodni slučaj, penetracija je manja, a zaobljenost vrha elektrode može rezultirati nestabilnošću električnog luka. Ipak, smjer pozitivnih iona (s elektrode na radni komad) rezultira razaranjem tankih površinskih oksida s površine osnovnog materijala što omogućuje zavarivanje aluminija, magnezija i njihovih legura. [4]

Zavarivanje TIG postupkom izmjeničnom strujom (AC – alternating current - izmjenična struja je vrsta električne struje gdje dolazi do promjene smjera toka elektrona u jedinici vremena) je način TIG zavarivanja gdje se uz mogućnost dobrog čišćenja oksida s površine osnovnog materijala dobiva i dobra penetracija, a termičko opterećenje je približno podjednako na elektrodi i radnom komadu (iako ovisi o balansu izmjenične struje). Pri tome, dolazi do mijenjanja pravca kretanja čestica (ovisno o frekvenciji struje), a time i do "gašenja i paljenja" luka što dovodi do njegove nestabilnosti (utjecaj ove pojave može se smanjiti dodatnim uređajem na izvoru struje koji proizvodi visokonaponsku i visokofrekventnu struju u trenutku "gašenja" luka). Kod TIG AC zavarivanja promjenom frekvencije izmjenične struje, ali i njezinim balansom (odnosom koliko vremena je elektroda na pozitivnom, a koliko na negativnom polu), može se utjecati na geometriju zavarenog spoja, čišćenje oksida, ali i termičko opterećenje radnog komada i elektrode. Primjeri kombinacije ovakvih parametara dani su slikom 3. [4]



Slika 2. a) Kontrola balansa izmjenične struje, b) Kontrola frekvencije izmjenične struje, c) Nezavisna kontrola jakosti struje [4]

- a) 1–veće EP vrijeme, veće čišćenje; 2 – veće EN vrijeme, manje čišćenje,
- b) kontrola frekvencije izmjenične struje: 1-manja frekvencija, "mekši" luk, manja

- penetracija; 2-veća frekvencija, usmjereniji luk, dublja penetracija,
- c) nezavisna kontrola jakosti struje: 1 - veća struja u EP području, manja penetracija; 2-veća struja u EN području, dublja penetracija, veća brzina zavarivanja.

## 2.4 Zaštitni plinovi

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupka zavarivanja su plemeniti plinovi helij i argon. Iako se u izvornom obliku TIG procesa koristio helij, danas je argon taj koji je dominantan u primjeni. Oba plina su inertna te daju zaštitnu atmosferu u kojoj ne dolazi do kemijskih reakcija između zaštitnog plina i osnovnog materijala. Osim primarnog cilja zaštitnog plina, a to je zaštita rastaljenog materijala od utjecaja atmosfere, važno je za naglasiti da zaštitni plin direktno utječe i na stabilnost te kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled zavarenog spoja kao i na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. [4]

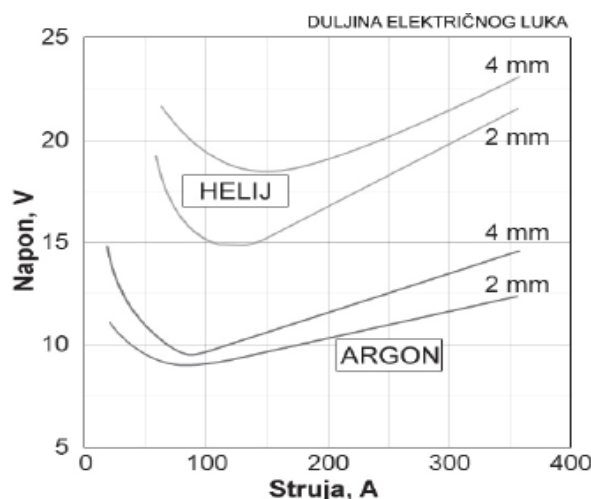
Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, ali to nije jedina njegova prednost. Ima niski ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion), 15,7 eV, što olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Također, 1,4 puta je teži od zraka te izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti rastaljeni metal, a ista karakteristika doprinosi i potrebi za manjim protokom prilikom zavarivanja. Argon u odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija i protaljivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95%, iznimno 99,997%. [4]



Slika 3. TIG argon [14]

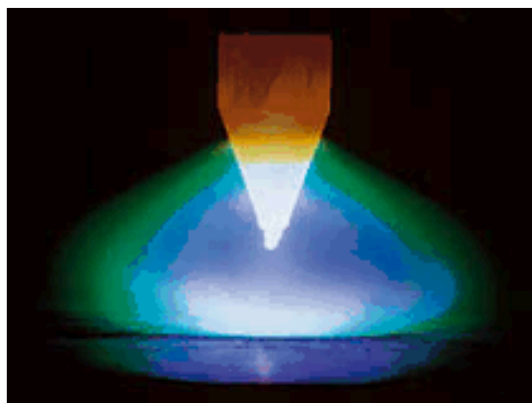
Helij je plin s višim ionizacijskim potencijalom (24,5 eV) što otežava uspostavu električnog luka. Male je mase (10 puta manje nego argon), zbog čega protoci helija moraju biti i do tri puta veću nego što je slučaj s argonom. Dobra strana helija kao zaštitnog plina je vrlo dobra toplinska vodljivost te daje širi električni luk. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i toplinski input (napon električnog luka sa zaštitnim plinom helijem je značajno veći nego kod argona pri istim strujama), slika 5.

Ova karakteristika posebno dolazi do izražaja prilikom zavarivanja materijala velike toplinske vodljivosti (npr. bakar) te zavarivanja pozicija većih debljina. Također, iz slike je vidljivo povećavanje napona električnog luka pri nižim strujama (kod helija je to između 50 i 100 A što je nepovoljno kod zavarivanja tanjih materijala koje se upravo i zavaruju u ovom rasponu struja. Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99%. [4]



Slika 4. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [4]

Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je upotreba i njihove mješavine u različitim omjerima. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava argona odnosno helija, a primjeri karakteristika zavarivanja spomenutim plinovima dana je u tablici 2. [4]



Slika 5. TIG argon/helij [14]

Tablica 2. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [4]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	smanjena	veća nego kod 100% Ar	veća
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100% Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro	sličnije kao kod 100% Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100% He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100% He	niža kod manjih struja
Oblik luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	širi
Napon luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100% Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego 100% Ar	veća nego 100% Ar

Osim spomenutih kombinacija plinova i mješavina, postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine pa tako, npr., vodik koji ima vrlo dobru toplinsku vodljivost povećava penetraciju dok se mješavine s dodatkom dušika upotrebljavaju uglavnom kod zavarivanja materijala s austenitnom strukturom.

Osim navedenog, važno je spomenuti da se TIG zavarivanje zbog nekih svojih nedostataka upotrebljava kod zahtjevnijih zavarenih spojeva gdje je česta i nužna zaštita korijenskog dijela zavarenog spoja. U ovom slučaju cilj je "odstraniti" zrak s korijenske strane spoja i upuhati zaštitni plin te ga održavati pod niskim pritiskom. Zaštita je moguća i kod sučeonih i kod cijevnih spojeva iz pomoć jednostavnih naprava, a često se upotrebljava i kod polu-automatiziranih sustava. [4]



Slika 6. TIG argon/vodik [14]

## 2.5 Gorionici za TIG zavarivanje

Osnovna podjela gorionika:

- zrakom hlađeni gorionici za ručno zavarivanje - koriste se za manje jakosti struje i manju interminenciju (najčešće do 200A),
- vodom hlađeni gorionici za ručno zavarivanje - koriste se za veće jakosti struje i veću interminenciju (uglavnom od 200 do 600A ),
- vodom hlađeni gorionici za strojno (automatsko) zavarivanje. [1]

Najčešći dijelovi gorionika su:

- držač za ruku (na/u njemu se nalaze: prekidač + provodnici struje, plina, rashladnog sredstva),
- vodilica volfram elektrode,
- raspršivač plina,
- kapa gorionika keramička sapnica za plin,
- volfram elektroda. [1]

## 2.6 Volframova elektroda

Netaljiva elektroda služi za uspostavu električnog luka između gorionika i radnog komada, tj, kao provodnik električne struje. Ne tali se, njezino trošenje isključivo je povezano sa oblikovanjem njezine geometrije brušenjem, ili eventualno oštećenjima zbog nepravilne tehnike rada. Prosječni vijek trajanja netaljive elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Elektrode se izrađuju od volframa, metala velike gustoće (poznat i kao tungsten; švedski: "teški kamen") i tališta 3422 °C. Razvojem TIG zavarivanja i izvora struje za zavarivanje dolazilo je i do većih zahtjeva u pogledu uspostave i stabilnosti električnog luka pa se danas upotrebljavaju elektrode koje nisu od čistog volframa, već se legiraju kako bi se poboljšale njezine radne karakteristike. [4]

Elektrode se izrađuju u promjerima 0,5; 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0; 6,4 i 8,0 mm, a duljine najčešće 150 mm (postoje i manje standardne duljine). Osim pravilnog izbora legirane elektrode, jednako je važna i priprema iste. Priprema se sastoji od zaobljena ili zašiljenja vrha prilikom čega valja imati na umu da geometrija netaljive elektrode direktno utječe na geometriju električnog luka. Zaobljeni vrh elektrode koristi se uglavnom kod zavarivanja Al, Mg i legura. Ostali materijali zahtijevaju šiljatu geometriju vrha elektrode (oblik stošca, visina stošca ovisi o zahtjevima geometrije luka). Prilikom izrade geometrije elektrode pravilnom tehnologijom brušenja izbjegavaju se nestabilnosti luka ili kontaminacija drugim metalima. [4]

Elektrode se izrađuju iz:

- čistog volframa,
- volfram sa dodacima torijevog oksida ( $\text{ThO}_2$ ),
- volfram sa dodacima cirkonijeva oksida ( $\text{Zr O}_2$ ),
- volfram sa dodacima lantanova oksida ( $\text{La O}_2$ ),
- volfram sa dodacima cerijeva oksida ( $\text{Ce O}_2$ ).

Tablica 3. Označavanje volframovih elektroda [5]

Oznaka (ISO)	Dodatak oksida (%)	Tip oksida	Boja
W	--	--	Zelena
WC20	1,8-2,2	CeO <sub>2</sub>	Siva
WL10	0,9-1,2	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Crna
WL15	1,4-1,6	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zlatna
WL20	1,9-2,1	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Plava
WZ8	0,7-0,9	Zr O <sub>2</sub>	Bijela
WT10	0,8-1,2	ThO <sub>2</sub>	Žuta
WT20	1,7-2,2	ThO <sub>2</sub>	Crvena
WT30	2,8-3,2	ThO <sub>2</sub>	Ljubičasta
WT40	3,8-4,2	ThO <sub>2</sub>	Narandžasta

Brušenje volframovih elektroda:

- pravilno u smjeru osi volframove elektrode (daje stabilan luk),
- nepravilno u smjeru okomitom na os volframove elektrode. [5]



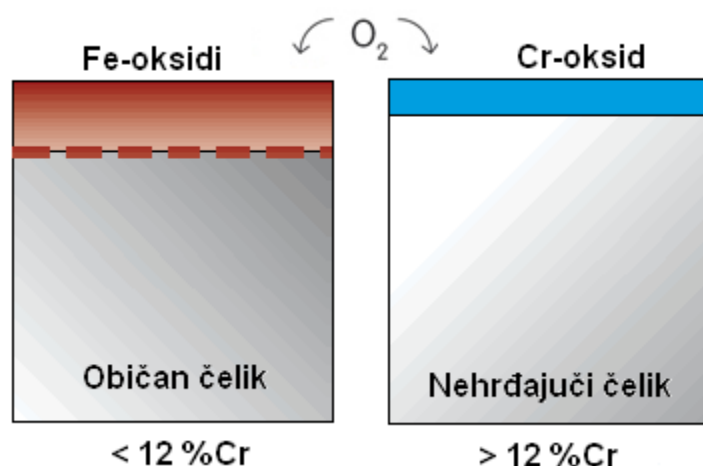
Slika 7. Pravilno i nepravilno brušenje elektrode [5]



### 3. Nehrdajući čelici

#### 3.1 Definicija nehrđajućih čelika

Nehrdajući čelik (eng. stainless steel) naziv je koji se koristi još od najranijih faza razvoja ovih čelika (početak XX. stoljeća). S početka prihvaćen kao generičko ime, danas označava široki raspon različitih vrsta i kvaliteta čelika otpornih na koroziju. Obilježava ih minimalni udio kroma od 10,5 % kao i dodatak ostalih legirajućih elemenata poput nikla, molibdena, titana, dušika, kojima se bilo modificira njihova struktura, ili postižu svojstva veće korozijske postojanosti, poboljšava obradivost, čvrstoća ili pak žilavost na sniženim (kriogenim) temperaturama. Navedeni udio kroma osigurava formiranje stabilnog oksidnog sloja na površini koji sprječava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima, slika 9. To je prvi uvjet korozijske postojanosti čelika. [2]



Slika 8. Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku . [2]

Oksidni sloj često se naziva pasivnim filmom. Vrlo je tanak, debljina mu je svega nekoliko nanometara (3 do 5). Nastaje spontano kao rezultat kemijske reakcije između kroma u čeliku i kisika iz zraka. Kemijski sastav, debljina i druga svojstva pasivnog filma ovise o kemijskom sastavu čelika i vrsti medija kojem je čelik izložen. U medijima koji sadrže kloride ovaj sloj nije stabilan i ne pruža dovoljnu zaštitu od daljnje korozije. [2]

Drugi uvjet antikorozivnosti je monofazna mikrostruktura. Ovaj uvjet ne mora biti nužno ispunjen. Većina nehrđajućih čelika ima monofaznu mikrostrukturu, ali postoje i oni čiju

mikrostrukturu čine dvije i više faza. Kod čelika čija se mikrostruktura sastoji samo od jedne faze izbjegnuta je opasnost od nastanka galvanskih članaka koji u vodljivom mediju mogu prouzročiti korozijsko trošenje materijala. [2]

Korozijski postojani čelici nisu postojani u svim medijima. Neki mediji mogu oštetiti i razoriti zaštitni oksidni sloj i izazvati koroziju čelika. Postoje različiti pojavni oblici korozije, a najčešći su rupičasta, interkristalna i napetosna korozija. Koji će oblik korozije nastati ne ovisi samo o korozivnom mediju već i o mikrostrukturi materijala te postojećem stanju naprezanja. [2]

Svi korozijski postojani čelici otporni su na oksidaciju pri normalnoj i povišenoj temperaturi, a neki od njih i pri visokoj temperaturi. Podjela na niske, povišene i visoke temperature napravljena je prema ruskim autorima u ovisnosti o temperaturi tališta svakog konkretnog materijala:

- niske temperature su do  $0,25 \cdot T_t$ :
- povišene temperature su između  $0,25 \cdot T_t$  i  $0,40 \cdot T_t$ :
- visoke temperature su temperature više od  $0,40 \cdot T_t$ . [2]

Za čelike su niske temperature do  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , povišene između  $180$  i  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a visoke iznad  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama primarno ovisi o masenom udjelu kroma. Neke legure s visokim udjelom kroma (25 do 30 %) mogu se primijeniti na temperaturi višoj od  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [2]

Na visokoj temperaturi postoji opasnost od pougličavanja (karbonizacije), koja se može izbjeći povišenjem sadržaja nikla (oko 35 %) u čeliku sa srednji sadržajem kroma (oko 16 %). [2]

Korozijski postojani čelici imaju vrlo široko područje primjene u kemijskoj, petrokemijskoj, procesnoj, industriji papira i drugim granama industrije, kao i za različite komercijalne proizvode poput kućanskih uređaja, dijelova automobila i slično. Koriste se puno u

postrojenjima za preradu mlijeka i mliječnih proizvoda, u farmaceutskoj industriji i postrojenjima za preradu hrane. [2]

Većina korozijski postojanih čelika daje se dobro zavarivati iako se često pri tom moraju primijeniti posebne mjere opreza. Osnovni problem pri zavarivanju je promjena mikrostrukture u metalu zavara i zoni utjecaja topline u odnosu na osnovni materijal. Narušavanje fazne ravnoteže, izlučivanje različitih intermetalnih faza, porast zrna i pojava segregacija u sastavu su samo neke od neželjenih pojava koje se, na žalost, ne mogu potpuno izbjeći. Navedene mikrostrukturne promjene loše utječu na mehanička svojstva i korozijsku postojanost. [2]

### **3.2 Podjela nehrđajućih čelika**

Za razliku od drugih tehničkih materijala koji se uglavnom klasificiraju po kemijskom sastavu korozijski postojani čelici su češće se razvrstavaju prema mikrostrukтури.

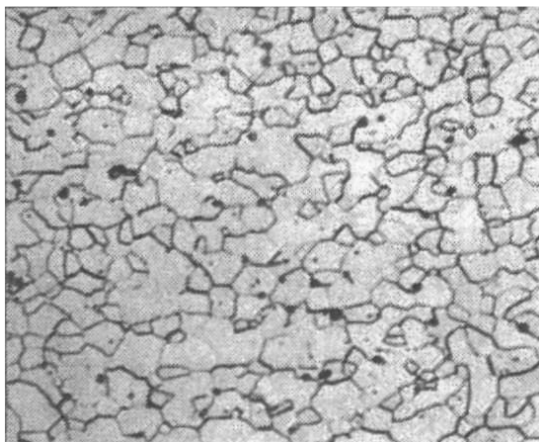
Mikrostruktura nehrđajućih čelika može biti potpuno ili pretežito feritna, martenzitna i austenitna pa tako postoje feritni, martenzitni i austenitni korozijski postojani čelici. Postoji i skupina koja ima takozvanu dupleks strukturu sastavljenu od približno 50 % austenita i 50 % ferita. To su dupleks korozijski postojani čelici koji posjeduju bolja svojstva od austenitnih i feritnih čelika. Osim nabrojanih postoji još jedna posebna skupina, a to su precipitacijski očvrtnuti čelici (Precipitation Hardenable – PH). Nazvani su po mehanizmu očvrtnuća kojim se povisuje njihova čvrstoća i tvrdoća. Precipitacijski očvrtnuti čelici grupiraju se nadalje, prema tipu metalne osnove u kojoj su precipitati izlučeni, na martenzitne, semi-austenitne ili austenitne. U tablici 4 navedene su osnovne skupine nehrđajućih čelika svrstane prema mikrostrukтури. [2]

Tablica 4. Osnovne skupine nehrđajućih čelika [2]

Naziv skupine		Mikrostruktura
Martenzitni		M ili M + K
Feritni		F
Austenitni		A
Dupleks		F + A
Precipitacijski očvrsnuti	martenzitni	M + precipitati
	semi-austenitni	M + precipitati
	austenitni	A + precipitati

### 3.2.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže 13-17% Cr i  $<0,1\%$  C te imaju feritnu mikrostrukturu bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja zrna, slika 9. Usitnjenje zrna moglo bi se postići u nekim slučajevima pomoću hladne deformacije (stupanj deformacije 30-50%) te rekristalizacijskim žarenjem (npr.  $615\text{ }^{\circ}\text{C}/15\text{ min.}$ ; hlađenje na zraku ili vodi). Mehanička svojstva i primjena nekoliko feritnih nehrđajućih čelika navedeni su u tablici 5. [3]



Slika 9. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [3]

Tablica 5. Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika [3]

Oznaka čelika VDEh (HRN)	Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva			Posebna otpornost i primjeri primjene
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{0.2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ , %	
X6 Cr 17 (Č4174)		450-600	270	20	Korozijski postojani pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji. Posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora.
X6 CrMo 17	1,1Mo	450-650	270	20	
X8 CrTi 17 (Č4971)	0,7 Ti	450-600	270	20	Kao X6Cr17, otporniji na rast zrna, za zavarene dijelove kućanskih aparata, za sita i okvire.
X8 CrNb 17	0,9Nb	450-600	270	20	Dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove). Za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama voća. <i>Nije za udarni rad!</i> Za otopine s visokim udjelom slobodnog klora. Za obradbu odvajanjem čestica na automatima: vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine.
X8CrMoTi 17	1,75Mo 0,65Ti	500-600	300	20	
X12CrMoTi25	2,5Mo 1,8Ti	650-750	550	12	
X12CrMoS17	0,25Mo 0,20S	700-850	450	12	

Feritni čelici su visoko korozijski otporni na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, amonijevoj salitri te smjesi dušične, fosforne i solne kiseline. Nasuprot tome, nisu otporni na djelovanje rastaljenih metala (Al, Sb, Pb), amonijevog biflourida, barijevog klorida, broma, octene kiseline itd. [3]

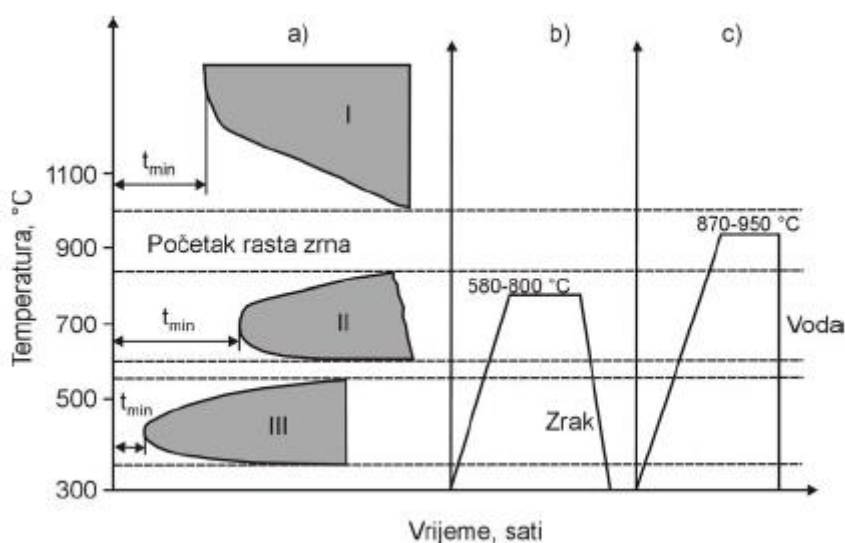
Ostala svojstva feritnih nehrđajućih čelika su:

- relativno su mekani,
- magnetični,
- slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna (>900 °C),
- skloni pojavi "krhkosti 475" pri izloženosti temperaturi 350-520 °C,
- skloni stvaranju krhke sigma faze (520-850 °C),
- slaba deformabilnost,
- dobra obradljivost odvajanjem čestica (bolja od austenitnih),
- loša postojanost u kloridnim otopinama (npr. morska voda),
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije,

- dodatkom molibdena povećava im se otpornost na jamičastu koroziju,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- skloni lomu pri niskim temperaturama. [3]

Uklanjanje ili smanjenje navedenih nedostataka može se postići povišenjem udjela kroma, sniženjem udjela ugljika, te legiranjem s molibdenom i niklom (eventualno titanom i niobijem). Znatna poboljšanja svojstava postižu se porastom čistoće feritnih čelika, tj. dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću suvremenih metoda rafinacije (npr. indukcijska vakuumaska peć, elektronski mlaz i sl.). Zbog niskih udjela “dodataka” takvi čelici se nazivaju ELA čelici (eng. Extra Low Additions). [3]

Na slici 11 prikazana su temperaturna područja u kojima kod feritnih čelika dolazi do pojave interkristalne korozije, sigma faze i “krhkosti 475”. Slike 10b i 10c prikazuju način toplinske obradbe kojom se mogu ukloniti nepoželjne pojave kod feritnih čelika. [3]



Slika 10. Shematski prikaz toplinske obradbe feritnih čelika [3]

- I – interkristalna korozija
- II – pojava sigma faze
- III – “krhkost 475”

Žarenje pri temperaturi 560-800 °C potrebno je provesti tako da se ne prekorači vrijeme  $t_{min}$  (slika 11) te da se hlađenje provede na zraku radi izbjegavanja “krhkosti 475”.

Također, uspješno je i gašenje s 870-950 °C ali tada treba uzeti u obzir pojavu porasta zrna. Zbog sklonosti feritnih čelika prema hladnom lomu mogu se koristiti za rad samo u

nekim agresivnim medijima pri temperaturi 20-350 °C. Glavni nedostatak feritnih nehrđajućih čelika tijekom zavarivanja predstavlja izrazita sklonost porastu zrna u zoni utjecaja topline koja je zagrijana iznad 900 °C. Pogrubljenje zrna feritnih čelika ne može se ukloniti nijednim postupkom toplinske obradbe. Stoga se za zavarivanje preporučuju postupci kojima se unosi manja količina topline (npr. REL, TIG). [3]

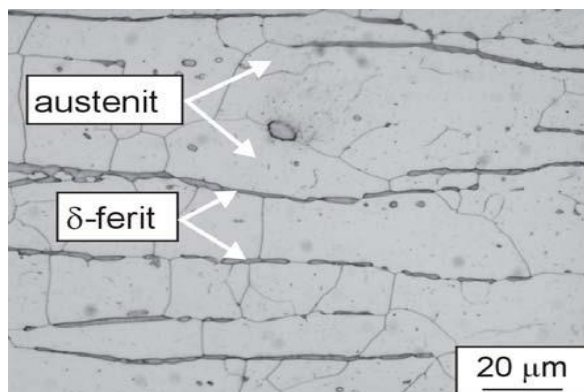
### **3.2.2 Austenitni nehrđajući čelici**

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 0,02-0,15% C, 15-20% Cr, 7-20% Ni uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titana, niobija, tantalata, dušika. Svi dodaci, osim dušika, dovode do pojave ferita u mikrostrukтури. [3]

Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. Austenitni čelici mogu prijeći u martenzitno stanje "dubokim" hlađenjem ili hladnom deformacijom. Međutim, mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika prvenstveno može biti monofazno austenitna ili austenitno-feritna (s 5-10% delta ferita). Delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj preradi (valjanje, kovanje), ali je ipak nužan radi otežavanja pojave toplih pukotina. [3]

Osnovni zahtjevi prema kemijskom sastavu potrebnom da se postigne austenitna mikrostruktura (slika 10) nehrđajućih čelika su:

- maseni udjel ugljika treba biti što niži (<0,15%) jer je tada manja opasnost od nastanka karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (odgovoran za pojavu interkristalne korozije),
- maseni udjel kroma što viši (>18%) radi povećanja antikorozivnosti,
- maseni udjel nikla što viši (>8%) kako bi nikal, kao gamageni element, prevladao alfa-geno djelovanje kroma i doveo do nastanka austenitne mikrostrukture,
- dodatno legiranje s molibdenom, titanom, niobijem i/ili tantalom koji pospješuju nastanak 5-10% delta ferita te djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji,
- povišeni udjel dušika (0,2-0,4%) radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i jamičastu koroziju. [3]



Slika 11. Mikrostruktura austenitnog čelika AISI 316 [3]

Glavna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su:

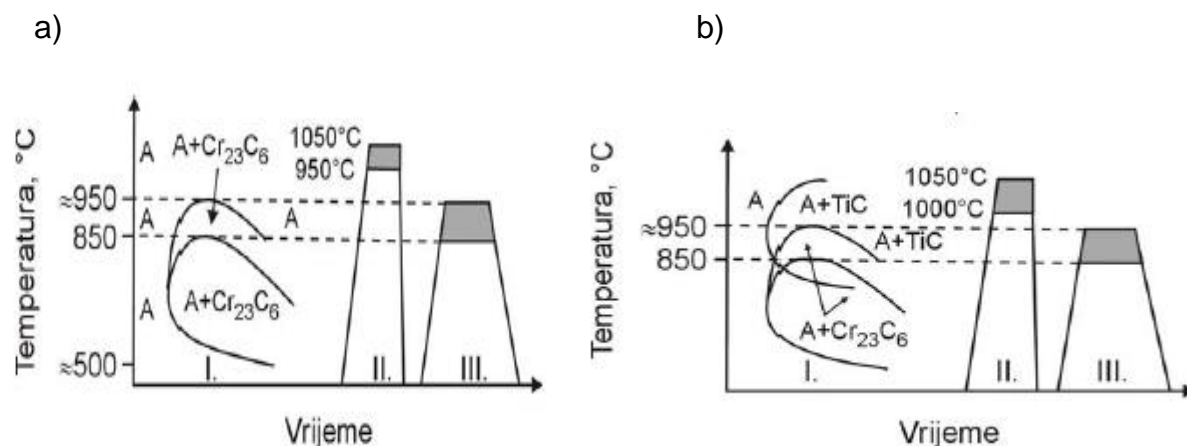
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nemagnetični su,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- odlična plastičnost,
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600 °C,
- visoka žilavost, oksidacijska i korozijska otpornost,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- postojana austenitna struktura od “solidus” temperature do ispod sobne temperature,
- kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja. [3]

Poznato je da toplinska obradba utječe na svojstva upotrebe i prerade, a time i na mogućnost primjene čelika. Austenitni čelici nisu sposobni da se zakale ili poboljšaju transformacijom jer nema faznih transformacija. [3]

Glavni problem u pogledu korozijske otpornosti predstavlja karbid  $\text{Cr}_3\text{C}_6$ . Nastanak karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  može se izbjeći ukoliko čelik sadrži jake karbidotvorce koji stvaranjem karbida tipa MC (npr.  $\text{TiC}$ ,  $\text{TaC}$ ,  $\text{NbC}$ ) onemogućavaju spajanje ugljika s kromom te na taj način sprječavaju osiromašenje perifernih zona austenitnih zrna. Na osnovi tih



spoznaja može se definirati postupak i cilj toplinske obradbe austenitnih nehrđajućih čelika (slika 12). [3]



Slika 12. Shematski prikaz toplinske obradbe nestabiliziranog (a) i titanom stabiliziranog (b) austenitnog nehrđajućeg čelika [3]

I. – shematski prikaz TTT dijagrama (samo za hlađenje); II. – gašenje (kaljenje bez polimorfne pretvorbe); III. – žarenje (stabilizacija destabiliziranog austenita).

Na slici 12 shematski su prikazane moguće promjene u mikrostrukturi tijekom hlađenja nestabiliziranih austenitnih nehrđajućih čelika. Može se zaključiti da:

- pri hlađenju (npr. sa  $\approx 1200$  °C) nastaje monofazno austenitna mikrostruktura do temperature  $\approx 950$  °C,
- između 950 i 850 °C dolazi do izlučivanja karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , ali nakon određenog vremena oni se ponovno raspadaju i difundiraju u austenit,
- pri sporom hlađenju između 850 i 550 °C iz austenita izlučuju karbidi  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ .

Navedeni karbidi nastaju od atoma ugljika i kroma iz perifernih područja zrna te uzrokuju senzibilizaciju čelika, a u nekim uvjetima i interkristalnu koroziju. Dugotrajno zadržavanje čelika u ovom temperaturnom području neće izazvati raspad karbida i difuziju kroma i ugljika u austenit. [3]

Iz svega navedenog može se zaključiti da će se jednom nastali  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  moći ukloniti iz nestabiliziranog austenitnog nehrđajućeg čelika pomoću:

- zagrijavanja u monofazno austenitno područje (karbidi će se raspasti pa će atomi ugljika i kroma biti "uvučeni" u austenit) i gašenja (radi izbjegavanja ponovnog izlučivanja karbida),

- žarenja pri 850-950 °C kako bi se nastale karbide "natjeralo" na disocijaciju i ponovnu difuziju atoma kroma i ugljika u austenit. Hlađenje nakon žarenja smije biti i sporije, jer su se atomi kroma i ugljika čvršće "usidrili" u austenitu nego u slučaju zagrijavanja u području gdje nastaje monofazni austenit. [3]

Za nestabilizirane austenitne nehrđajuće čelike je učinkovitiji postupak gašenja iz područja monofaznog austenita.

U slučaju stabiliziranih austenitnih čelika (slika 12b) može se uočiti da:

- hlađenjem austenita do  $\approx 950$  °C dolazi do izlučivanja karbida (TiC) iz austenita pri čemu dolazi do vezivanja najvećeg dijela ugljika. Na taj način je smanjeno ili potpuno spriječeno stvaranje kromovog karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,
- ukoliko bi se i pojavilo izlučivanje  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (npr. u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja) već bi žarenje između 850 i 950 °C izazvalo prijelaz  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  u TiC i difuziju atoma kroma u austenit. [3]

Tablice 6 i 7 prikazuju osnovne podatke o sastavu, svojstvima i primjeni nekoliko vrsta austenitnih čelika s manje od 10% delta ferita i austenitnih čelika bez delta ferita. Minimalan sadržaj delta ferita u austenitnim nehrđajućim čelicima je nužan radi osiguravanja otpornosti prema pojavi toplih pukotina. Pritom, gornja dopuštena granica delta ferita iznosi  $\sim 10\%$ , jer bi kod višeg udjela delta ferita znatno porasla sklonost nastanku sekundarnih faza (npr.  $\sigma$ -faza) pri povišenim temperaturama. [3]

Pojava interkristalne korozije može se spriječiti snižavanjem sadržaja ugljika ispod 0,03%. U anglosaksonskoj stručnoj literaturi se takvi čelici označavaju po normi AISI tako da se uz brojčanu oznaku dodaje slovni dodatak L, LC ili ELC (eng. Low Carbon ili Extra Low Carbon). Na slici 11a može se uočiti glavna prednost ove skupine čelika: otpornost na senzibilizaciju tj. interkristalnu koroziju. Međutim glavni nedostatak austenitnih čelika predstavlja sniženje granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika (12b). [3]

Tablica 6. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika s &lt;10% delta ferita u mikrostrukturi [3]

Oznaka čelika		Sastav "ostalo", %	Mehanička svojstva pri 20°C					Posebna otpornost i primjeri primjene
Oznaka čelika prema VDEh	HRN M <sub>s</sub> M <sub>d</sub>		R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	HB	A <sub>5</sub> , %	KV, J	
X12 CrNi 18 8	Č4571 M <sub>s</sub> = -58 °C M <sub>d</sub> = +25 °C	-	700	215	180	50	85	Standardni tip čelika -predmeti u kućanstvu, aparati i uređaji u prehrambenoj industriji, u mljekarama, u pivovarama, ortopediji. Primjenjiv je do 300°C. Otporan na različite organske i anorganske kiseline
X5 CrNi 18 9	Č4580 M <sub>s</sub> = -32 °C M <sub>d</sub> =+37 °C	-	700	185	180	50	85	- industrija masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, aparata za pranje. Primjenjiv do 300°C.
X10 CrNiTi 18 9	Č4572 M <sub>s</sub> = -72 °C M <sub>d</sub> = +14 °C	0,5 Ti	750	205	190	40	85	Otporan na IKK i bez topl. obradbe nakon zavarivanja, -mljekarstvo, industrija namirnica, te masnih kiseline, sapuna, kože, šećera, industrija filmova. Primjenjiv za tlačne spremnike do 450°C.
X5 CrNiNb 18 9		0,7 Nb	740	205	190	40	103	Otporan na dušičnu kiselinu.
X5 CrNiMo 18 10	Č4571 M <sub>s</sub> =-188 °C M <sub>d</sub> =-25 °C	2,25 Mo	700	205	180	45	85	Otporan prema neoksidirajućim kiselinama i prema točkastoj koroziji uslijed halogenih medija, otporan na IKK i bez topl. obradbe. -industrija celuloze, boja, ulja, sapuna, tekstila, mljekarstva i pivovare Posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima, topl. obradba nakon zavarivanja nepotrebna.
X10 CrNiMoTi 18 10	Č4571 M <sub>s</sub> =-208 °C M <sub>d</sub> =-48 °C	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	-industrija tekstila, sulfita, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plast. mase

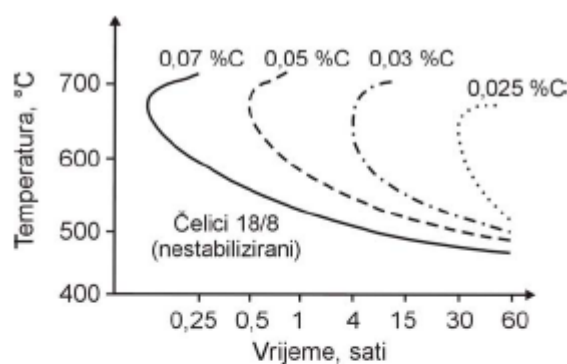
M<sub>s</sub> – temperatura početka stvaranja martenzita pri "dubokom" hlađenju,

M<sub>d</sub> – temperatura početka stvaranja martenzita pri hladnom deformiranju

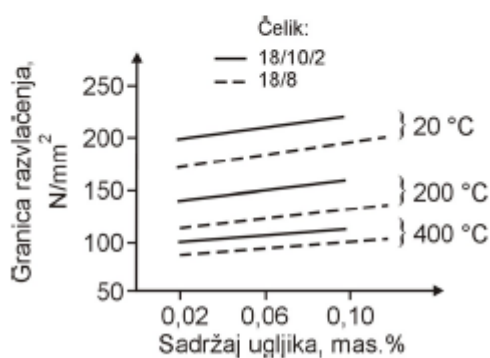
IKK – interkristalna korozija

Tablica 7. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika bez  $\delta$ -ferita u mikrostrukturi [3]

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, "ostalo" %	Mehanička svojstva					Posebna postojanost i primjeri primjene
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	HB	$A_5$ , %	KV, J	
X5 NiCrMoCuNb 20 18	2,25 Mo 2 Cu 0,4 Nb	740	225	190	40	82	Posebno povišena postojanost prema sumpornoj i fosfornoj kiselini - industrija boja, umjetnih vlakana, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe
X5 CrNiMoTi 25 25	2,25 Mo 0,25 Ti	740	225	190	40	69	Industrija tekstila, celuloze, boja, fotopribora i kemikalija, plast. masa, gume, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe
X5 NiCrMoCuNb 22 18	3,25 Mo 0,4 Nb 1,25 Cu	740	275	190	30	105	Industrija boja, plastike i nafte



(a)



(b)

Slika 13. Utjecaj sadržaja ugljika na početak izlučivanja karbida (a) i utjecaj sadržaja ugljika na granicu razvlačenja Cr-Ni i Cr-Ni-Mo čelika (b) [3]

Najčešće primjenjivani čelici s niskim sadržajem ugljika su: AISI 304L, AISI 316L, AISI 316LC (tablica 8). Austenitni nehrđajući čelici mogu biti legirani i dušikom koji kao gamageni element može zamijeniti skuplji nikal. Dušik stvara nitride te intersticijske

mješance sa željezom. Na taj način dolazi do porasta granice razvlačenja i čvrstoće (tablica 9). Pored povišenja navedenih mehaničkih svojstava poboljšava se i otpornost na napetosnu koroziju. Dodatkom 0,2% dušika i 2% molibdena djelotvorno se povisuje postojanost prema jamičastoj koroziji. [3]

Tablica 8. Primjeri niskougličnih austenitnih nehrđajućih čelika [3]

Oznaka čelika			Sastav "ostalo", %	Mehanička svojstva				
Oznaka prema VDEh	HRN	AISI		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ , %	Z, %	KV, J
X2CrNi 18 9	Č45701	304 L	-	450-700	175	50	60	85
X2CrNiMo 18 10	Č45703	316 L	2,2Mo	450-700	195	45	60	85
X2CrNiMo 18 12	-	316LC	2,8Mo	450-700	195	45	60	85
X2NiCr 18 16	-	-	-	440-690	175	50	60	85
X2CrNiMo 18 16	-	-	3,5Mo	500-700	195	45	-	85

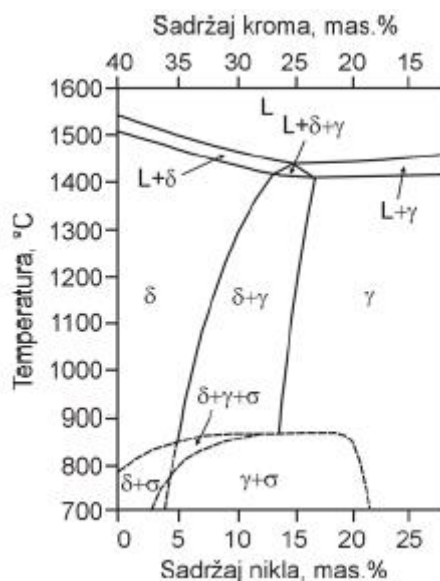
Tablica 9. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika legiranih dušikom [3]

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva			
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ , %	KV, J
X2CrNiN 18 10	0,12-0,22 N	550-700	270	40	85
X2CrNiMoN 17 12 2	0,12-0,22 N	580-800	280	40	85
X2CrNiMoN 17 13 5	0,12-0,22 N	580-800	285	35	85
X2CrNiMoN 25 25 2	0,08-0,16 N	540-740	255	40	70
X3CrNiMnMoN 19 17	0,25 N 0,16 Nb 5,5 Mn 3,0 Mo	800	380	40	100
X3CrNiMnMoN 23 17	0,45 N 6,0 Mn 4,0 Mo	850-1050	540	30	70

### 3.2.3 Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici

Dupleks čelici posjeduju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu s 40-60% ferita. Čelik s 22-24% kroma i 6-8% nikla pri temperaturi 20 °C, tj. zagrijan do ≈1000 °C sastojati će se od ferita i austenita. Ukoliko su prisutni ostali legirajući elementi tada vrijedi da dodatak molibdena, silicija, titana i niobija djeluje slično kao porast sadržaja kroma, a mangana, bakra, dušika i ugljika kao povišenje sadržaja nikla. Povišenjem temperature iznad 1000°C poraste udio ferita, a smanjuje se udio austenita tako da čelik s 22% kroma i 8% nikla pri 1350°C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu. Kvazibinarni presjek

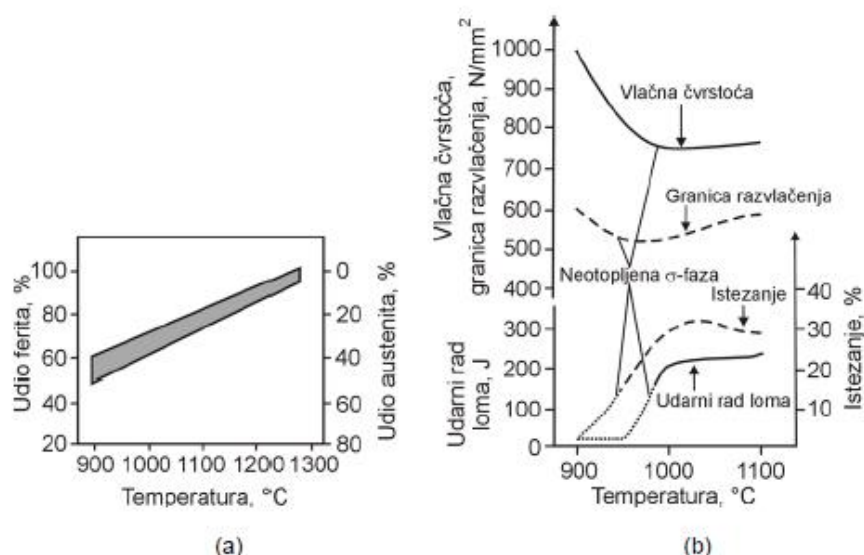
ternarnog dijagrama stanja Fe-Cr-Ni prikazan je slikom 14. [3]



Slika 14. Kvazibinarni presjek ternarnog dijagrama stanja Fe-Cr-Ni za 60% Fe [3]

Intermetalna sigma-faza može nastati u austenitu i feritu. Sigma faza se može ukloniti žarenjem iznad 1000 °C. Zbog dvofazne austenitno-feritne mikrostrukture dupleks čelici pokazuju manju otpornost prema općoj koroziji, ali imaju znatno povišenu postojanost prema napetosnoj koroziji u kloridnim otopinama kao i u atmosferi H<sub>2</sub>S-a. [3]

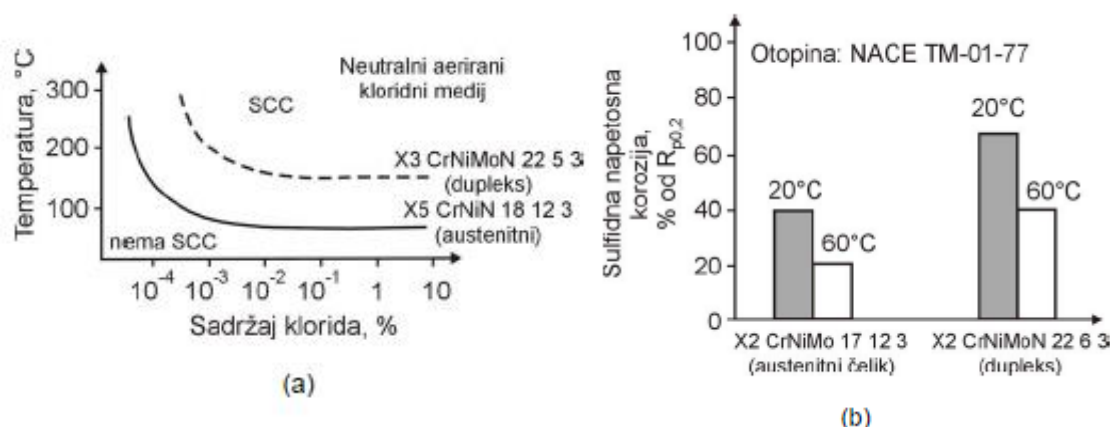
Jedan od glavnih ciljeva legiranja dupleks čelika je održavanje dovoljno visokog udjela austenita što je posebice važno tijekom zavarivanja (u zoni taljenja zavarenog spoja). Previsoki udio ferita može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti te pojavu krhkosti. Sniženi udio nikla u dupleks čelicima (u odnosu na čelik 18/8) potrebno je kompenzirati dodatkom dušika ili mangana. Omjer austenita i ferita ovisi i o temperaturi toplinske obradbe, slika 15a. Pri temperaturi gašenja ispod 1050 °C zaostaje dio neotopljene sigma faze, slika 15b. Međutim, budući da iznad 1100 °C dolazi do znatnog porasta sadržaja ferita dupleks čelici se uglavnom ne zagrijevaju iznad 1100 °C. Porastom sadržaja ferita iznad 60% dolazi do pojave diskontinuiranih izlučivanja po granicama austenit-ferit, stvaranja nitrida Cr<sub>2</sub>N, otapanja karbida Cr<sub>3</sub>Nb<sub>3</sub>C itd. Navedene pojave znatno utječu na pogoršanje mehaničkih svojstava, posebice duktilnosti. [3]



Slika 15. Promjena udjela austenita i ferita s temperaturom zagrijavanja dupleks čelika (a) i ovisnost mehaničkih svojstava dupleks čelika X2CrNiMoN 22 5 o temperaturi gašenja [3]

Primjena dupleks čelika pri povišenim temperaturama je moguća, ali zbog ograničenja primjene na maksimalno 250-350 °C primjena je znatno sužena. Razlog tog ograničenja primjene je pojava “krhkosti 475” koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi po istom principu kao i kod feritnih čelika. Posljedice izlučivanja pri  $475 \pm 100$  °C koje izazivaju “krhkost 475” mogu se ukloniti gašenjem s 900-950 °C. [3]

Pritom, ferit ima višu granicu razvlačenja, nižu vlačnu čvrstoću i nižu plastičnost nego austenit. U dupleks čelicima ferit predstavlja anodu austenitu, tj. austenit je katodno zaštićen. Kod izrazito visokih naprezanja ferit može biti trajno deformiran tako da napukne austenitno zrno, ali se napuklina ipak zaustavlja na graničnoj površini ferit/austenit te tek na kraju puca ferit. Dupleks čelici pokazuju izrazito povoljnije ponašanje od austenitnih ukoliko su izloženi djelovanju klorida i sumporovodika, slika 16. Dupleks čelici su postojani prema napetostnoj koroziji, te su manje osjetljivi prema pojavi vodikove krhkosti. [3]



Slika 16. Usporedba ponašanja dupleks i austenitnog čelika u ovisnosti o sadržaju klorida i temperaturi (a) te sulfidnoj napetosnoj koroziji (b) [3]

Postojanost dupleks čelika prema interkristalnoj koroziji je viša što je viši sadržaj ferita. Budući se krom otapa u feritu a ugljik u austenitu teže se stvaraju karbidi  $Cr_{23}C_6$  nego kod austenitnih čelika. Karbid  $Cr_{23}C_6$  nastati će na granicama ferit/austenit pa je mreža karbida isprekidana, a napredovanje korozije sporije nego kod austenitnih čelika. [3]

Pojave koje uzrokuju krhkost dupleks čelika slične su pojavama koje se javljaju kod feritnih čelika: sigma faza (600-900 °C) i "krhkost 475" (400-500 °C). Uklanjanje navedenih oblika krhkosti može se provesti zagrijavanjem čelika na 1050-1100 °C te hlađenjem u vodi. Žarenjem na 870-950 °C mogu se učinkovito ukloniti izlučeni karbidi kroma koji nastaju po granicama ferit/austenit. Nakon takvog žarenja potrebno je provesti hlađenje na zraku ili u ulju radi izbjegavanja nastanka sigma faze i "krhkosti 475°C". [3]

U praksi se najčešće koriste slijedeće vrste dupleks čelika (prema VDEh): X4 CrNiMoNb 25 7 2, X6 CrNiMoTi 20 6 2, X2 CrNiMoSi 18 5 3, X2 CrNiMoN 22 5 3, X8 CrNiMoN 27 5 2, X2 CrN 26 5 4, X3 CrNiMoCuN 24 5 2 itd. [3]

Dupleks čelici se najčešće primjenjuju u industriji nafte i plina (crpke, desulfurizatori, destilatori, desalinizatori, ventili, cjevovodi, pumpe), petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, apsorberi, separatori, izmjenjivači topline), kemijsko-procesnoj industriji (u proizvodnji kiselina, rad s otopinama HF u  $HNO_3$ , uređaji za  $H_2SO_4$ , sapnice), brodogradnji (osovine propelera, kormila, crpke, grijači, ležajevi), industriji papira (ventili,

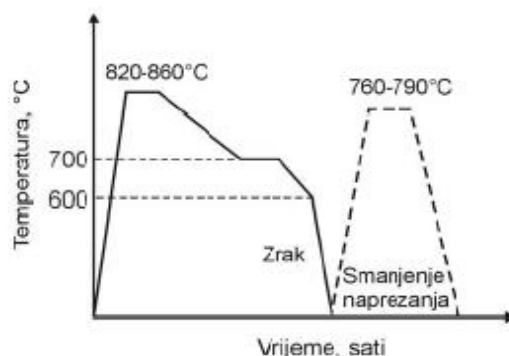


cijevi regeneracijskih peći, osovine mješača, pročišćavanje vode), transportu (cisterne). [3]

### **3.2.4 Martenzitni nehrđajući čelici**

Martenzitni nehrđajući čelici imaju povišeni udio ugljika (0,20-1,0%), iznad 13% kroma (do 18%) te mogu sadržavati i do 1,3% molibdena i 2,5% nikla. Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost ove skupine čelika postiže se kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Martenzitni nehrđajući čelici mogu se podijeliti u dvije podskupine: konstrukcijski (sadrže do  $\approx 0,25\%$  C, poboljšavaju se) i alatni čelici ( $>0,3\%$  C, nakon kaljenja se nisko popuštaju). Kod konstrukcijskih čelika posebna pažnja se usmjerava prema korozijskoj postojanosti, a kod alatnih postoji dodatni zahtjev prema otpornosti na abrazijsko trošenje. Radi toga alatni čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu (martenzit + karbidi) čija je korozijska postojanost niža od jednofazne martenzitne mikrostrukture. [3]

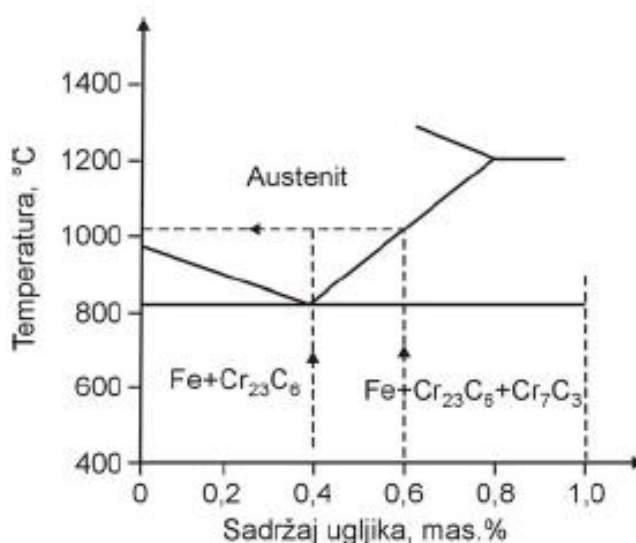
Čelici s 13% kroma i iznad 0,3% ugljika pri 1000 °C u austenitu imaju otopljeno oko 12,5% kroma i 0,3% ugljika što je dovoljno za korozijsku postojanost budućeg martenzita, ali nedovoljno za maksimalnu zakaljenost čelika (trebalo bi biti otopljeno 0,6% C ili više). Stoga je austenitizaciju potrebno provesti na višim temperaturama. Ukoliko bi sadržaj kroma bio na donjoj granici ( $\approx 12\%$ ) pojavila bi se opasnost izostanka korozijske postojanosti popuštenog martenzita. Dijagram postupka žarenja martenzitnih čelika prikazan je na slici 17. Nakon žarenja na 820-860 °C preporuča se provođenje dodatnog žarenja na 760-790 °C radi smanjenja naprezanja. Dodatno žarenje se može provesti nakon grube obrade odvajanjem čestica tj. prije završne obradbe. [3]



Slika 17. Shematski prikaz dijagrama žarenja martenzitnih čelika [3]

Konstruktivski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika ( $<0,30\%$ ) od alatnih pa se popuštaju pri višim temperaturama. Gašenjem se postiže monofazna martenzitna ili martenzitno-karbidna struktura (osim čelika X22 CrNi 17 koji je nakon kaljenja martenzitno-austenitno-feritne mikrostrukture). [3]

Čelike s 13% kroma treba austenitizirati pri  $\approx 1000^\circ\text{C}$  da bi se otopilo oko 0,6% ugljika u austenitu (slika 17). Tako npr. čelik X42 Cr 13 sa samo 0,4% ugljika pri  $1000^\circ\text{C}$  ima monofaznu austenitnu mikrostrukturu, koja gašenjem prelazi u martenzitnu. Pritom vrijedi da ako čelik sadrži manje ugljika više će se kroma otopiti u austenitu i čelik će nakon kaljenja biti jače korozijski postojan. [3]



Slika 18. Pseudobinarni dijagram Fe-Fe<sub>3</sub>C kod sadržaja kroma 13% [3]

Da bi martenzitni čelik imao povišenu postojanost prema koroziji i zadovoljavajuća mehanička svojstva (kao npr. čelik X20Cr13) potrebno je povišiti sadržaj kroma na 17-18%. Međutim, porast sadržaja kroma neizbježno dovodi do proširenja područja delta ferita. To se može izbjeći:

- povišenjem sadržaja ugljika (nepovoljno se utječe na korozijsku postojanost),
- dodatkom određene količine nikla (1,5-2%) koji sužava područje delta ferita. [3]

Na taj način razvijen je čelik X22 CrNi17 koji je otporan na jamičastu koroziju u morskoj vodi. Svojstva i primjena nekoliko najznačajnijih martenzitnih čelika navedeni su u tablici 10.

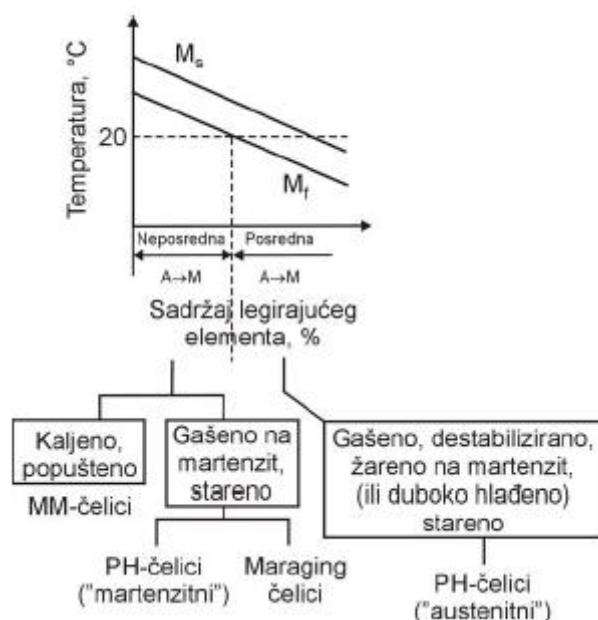
Tablica 10. Svojstva i primjena martenzitnih nehrđajućih čelika [3]

Čelik	Posebno postojan	Primjeri primjene
X20 Cr 13 (Č4172)	- na vodu i vodenu paru, na organske kiseline: octenu, mliječnu, voćnu	- kirurški instrumenti (kliješta, pincete) - pribor za jelo: vilice, žlice - strojni dijelovi: osovine, stapajice, ventilni stošci, sapničke igle, turbinske lopatice, "holandski" noževi (za papir)
X20 CrMo 13	- povišena postojanost u odnosu na X20 Cr 13 (posebno toplinska)	- kao X20 Cr 13 ali za radne temperature i do 500 °C, za toplinski napregnute opruge
X22 CrNi 17 (Č4570)	- na organske kiseline koje se javljaju u industriji namirnica, octene kiseline i sapuna, na oksidirajuću razrijeđenu HNO <sub>3</sub> , postojan na morsku vodu	- osovine, ventili, dijelovi pumpa, dijelovi uređaja u mljekarama, u industriji papira, u proizvodnji kvasca i škroba, za dijelove kompresora
X30 Cr 13 (Č4173)	- na vodu i paru (samo u kaljenom stanju)	- opruge, vijci (za rad u agresivnoj atmosfera), škare, mjerni alat
X36 CrMo 17 (alatni)	- u atmosferi aminokiselina, octene kiseline, pa i solne kiseline (PVC)	- dijelovi kalupa za preradu polimera, kirurški rezni alat, zubarski alat
X42 Cr 13 (alatni)	- kao X36 CrMo 17	- kao X36 CrMo 17, posebno za aminoplaste
X45 CrMoV 15	- otporan do 500 °C	- različiti rezni alati, kirurški skalpel
X90 CrMoV 18	- istovremeno vrlo otporan na trošenje i koroziju	- noževi za meso, skalpeli, korozijski postojani kotrljajući ležajevi, sapnice, pribor za jelo otporan na abrazijske praške za čišćenje, britve, žileti

Ukoliko se sadržaj ugljika smanji (<0,10%) tada nastaju tzv. mekomartenzitni nehrđajući čelici koji spadaju u visokočvrste čelike (granica razvlačenja do 1000 N/mm<sup>2</sup>). Sniženje

mehaničkih svojstava (čvrstoća, granica razvlačenja) u tom slučaju nadomješta se legiranjem s kromom (13-18%), niklom (1-6%) i molibdenom (<3%). [3]

Mekomartenzitni čelici s 0,03-0,05% ugljika postižu zadovoljavajuća mehanička, fizikalna i kemijska svojstva austenitizacijom, gašenjem i popuštanjem pri 450-700 °C (slika 18). Preostale tri skupine čelika označene na slici 19 (PH-martenzitni, maraging i PH-austenitni) pored visokog udjela kroma, nikla i molibdena mogu sadržavati i bakar, niobij, aluminij, titan, cirkonij koji međusobno ili s drugim elementima stvaraju intermetalne spojeve. Intermetalni spojevi nastaju u prethodno stvorenom martenzitu pa se očvrnuće takvih čelika pripisuje precipitacijskom djelovanju. Stoga se takvi čelici označavaju kao PH-čelici (Precipitation Hardened) i pripadaju skupini ultračvrstih čelika. [3]



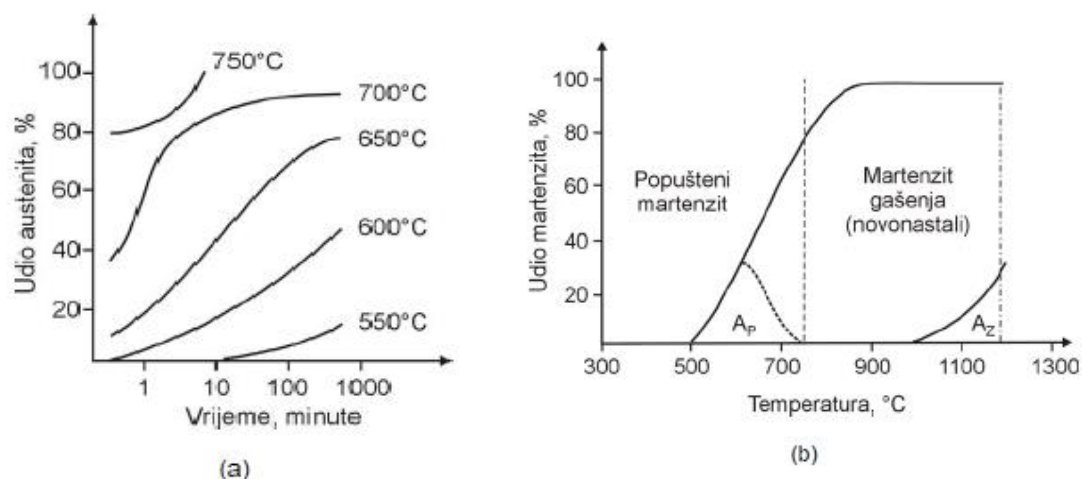
Slika 19. Shematski prikaz podjele niskougličnih martenzitnih čelika [3]

MM – mekomartenzitni, PH – precipitacijski očvrsnuti (eng. Precipitation Hardened),

$M_s$  – temperatura početka stvaranja martenzita,  $M_f$  – temperatura početka stvaranja martenzita

Nastanak mikrostrukture mekomartenzitnog čelika najjednostavnije se može objasniti pomoću TTA dijagrama (Time-Temperature-Austenitizing), slika 20. Pritom se može primijetiti da je maksimalna dopuštena radna temperatura ove skupine čelika oko 500 °C jer već pri 550 °C nakon 800 sati može nastati do 15% austenita. Potpuno martenzitna mikrostruktura može se postići gašenjem s temperature 900-1000 °C. Ukoliko bi temperatura gašenja bila veća od 1000 °C došlo bi do pojave zaostalog austenita ( $A_z$ ).

Soga se u praksi ne austenitizira iznad 1050 °C zbog opasnosti od rasta austenitnih zrna (slika 19). Zagrijavanjem martenzita nastalog gašenjem do ~500 °C dolazi do popuštanja martenzita ali njegov udio ostaje 100%. Zagrijavanjem na 500-700 °C dolazi do pojave austenita popuštanja ( $A_p$ ) koji je fino dispergiriran u martenzitu i može osigurati visoku žilavost i dobru zavarljivost. Iz tog razloga preporuča se da se popuštanje mekomartenzitnih čelika provodi na temperaturi 680 °C, tablica 11. [3]



Slika 20. Shematski prikaz TTA dijagrama (a) te područja mikrostruktura popuštanja i gašenja (b) mekomartenzitnog čelika s 14% Cr, 5% Ni i 1,5% Mo [3]

Tablica 11. Primjeri temperature gašenja i popuštanja mekomartenzitnih čelika [3]

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, ostalo %	Gašenje		Popuštanje		$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>
		$\vartheta_a$ , °C	Sredstvo	$\vartheta_p$ , °C	$t_p$ , h	
X5 CrNi 13 14	$\leq 0,7$ Mo	900-1000	zrak	450	2	900
				530	8	850
				600	8	600
X3 CrNi 13 4	$\leq 1,0$ Mo	950-1050	zrak	680	2	750
X5 CrNi 13 6	-	950-1050	zrak	530	8	850
				600	8	600
X5 CrNi 17 4 X4 CrNiMo 13 4	0,5 Mo	do 1000 950-1050	zrak zrak	580		540
				550		850
				620		600
X3 CrNiMo 14 5	2,3 Mo	950-1050	zrak	450	2	990
				500	2	1000
				600	2	800
(G)-X5CrNiMo 16 5	1,5 Mo	1000	zrak	520		800
				600		530
				450	2	980
X4 CrNiMo 16 5	1,0 Mo	1000	zrak	500	2	1020
				620	2	580
				680	2	670

$\vartheta_a$  – temperatura austenitizacije,  $\vartheta_p$  – temperatura popuštanja,  $t_p$  – vrijeme popuštanja

Mekomartenzitni čelici uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka (iznimno djelovanju morske vode), izradu lopatica Peltonovih i Kaplanovih turbina, za valjke u proizvodnji papira, izradu dijelova pumpi (rotori, osovine, lopatice, klizne plohe) itd. [3]

## 4. Eksperimentalni rad

### 4.1 Opis eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu opisan je proces izrade tlačne posude volumena 800L. Cilj eksperimenta je prikazati kako se odvija proces izrade posude od nehrđajućeg čelika sa naglaskom na postupke TIG i plazma zavarivanja nehrđajućeg čelika za prehrambenu industriju, od nabave materijala do gotovog proizvoda.

Eksperiment se provodi u pogonu tvrtke Tomo Varga d.o.o. Tvrtka Tomo Varga d.o.o. koja se bavi konstruiranjem i izradom strojeva, uređaja i njihove opreme u procesnoj, prehrambenoj, farmaceutskoj i kemijskoj industriji.



Slika 21. Pogon tvrtke Tomo Varga d.o.o. [14]

VR800L je posuda koja spada u tlačnu opremu, kategorije III prema Pravilniku o tlačnoj opremi (NN79/16) / PED 2014/68/EU. Rezervoar je cilindričnog oblika promjera 750 mm i ukupne duljine 2348 mm. Posuda se sastoji od tijela posude, priključaka, servisnog otvora i postolja. Posuda je u vertikalnom položaju na 3 oslonca. Medij u posudi je pivo, voda i CO<sub>2</sub> (ugljik-dioksid). Radni tlak u posudi je od -1 / 4 bar i ograničava se sigurnosnim uređajem za kojeg je odgovoran korisnik. Kontrolu radnog tlaka putem sustava osigurava korisnik. Totalni ispust je na dnu posude osiguran priključkom DN40. Posuda je izrađena iz nehrđajućeg čelika kvalitete X5CrNi18-10, X2CrNiMo17-12-2, X6CrNiTi18-10.

## 4.2 Odabir materijala

Prema zadanoj specifikaciji od strane naručitelja, prva faza je narudžba materijala. U skladu sa sastavnicom na nacrtu potrebno je izvaditi sve pozicije te navesti sljedeće:

- količinu svake pozicije,
- dimenzije,
- vrstu materijala,
- kemijski sastav.

Izrađeni dokument šalje se dobavljačima materijala te isti šalju povratnu ponudu sa traženim pozicijama. Prilikom narudžbe materijala važno je zatražiti za svaku poziciju atest materijala (cijevi, koljena, okrugli profili, cijevna armatura...). Prilikom dolaska robe u pogon provodi se kontrola ulaska robe u proizvodnju. Uspoređuje se broj šarže na materijalu sa brojem šarže na atestu kojeg je zaprimila osoba u nabavi materijala. Važno je da se šarže podudaraju kako bi naručitelj bio siguran u postojanost materijala bez dodatne kontrole. Nakon kontrole ulaska sav materijal se razvrstava te se skladišti na za to predviđeno mjesto.

## **4.3 Tehnologija zavarivanja**

### **4.3.1 Općenito**

Ova tehnologija odnosi se na zavarivanje konstrukcija i tlačne opreme prema certifikaciji proizvođača. Ovom tehnologijom propisuje se postupak pri izvedbi zavarivanja.

### **4.3.2 Osnovni materijal**

Osnovni materijal je specificiran projektom i specifikacijama postupaka zavarivanja. Kvaliteta osnovnog materijala mora biti potvrđena odgovarajućom atestnom dokumentacijom.

### **4.3.3 Dodatni materijal za zavarivanje**

Za dodatni materijal za zavarivanje TIG postupkom propisuje se korištenje žice za zavarivanje u šipkama promjera 1.6 i 2.0 mm. Propisni dodatni materijal naveden je u pripadajućim WPS listama. Dodani materijal za zavarivanje mora biti u skladu s klasifikacijom i odobren od ovlaštenih institucija. Zamjenu ili korištenje drugih dodatnih materijala mora odobriti ovlaštena osoba. Žice za zavarivanje moraju biti neoštećene, bez tragova korozije, masti, ulja, laka, zemlje i drugih nečistoća koje mogu štetno utjecati na kvalitetu zavarenog spoja.

Zaštitni plinovi za zavarivanje (Ar) moraju biti skladišteni u čeličnim bocama s ispravnim regulacijskim ventilima i manometrima s mjerачima protoka zaštitnog plina. Atesti dodatnog materijala moraju biti pribavljeni prije početka zavarivanja.

### **4.3.4 Postupci zavarivanja**

Svi postupci zavarivanja provode se prema uputama za zavarivanje (WPS) koje moraju biti odobrene kvalifikacijom postupka (PQR) prema HRN EN 15614-1. Svi spojevi će se zavarivati TIG (141) postupkom.



#### **4.3.5 Zavarivači**

Zavarivači koji zavaruju trebaju imati valjani atest za postupak zavarivanja prema HRN EN 287-1 ili HRN EN 9606-1, za materijale, debljine i promjere na kojima zavaruju.

#### **4.3.6 Uređaji i oprema za zavarivanje**

Prije početka radova potrebno je osigurati dovoljan broj odgovarajućih izvora za zavarivanje. Svi uređaji moraju imati odgovarajući važeći certifikat o tehničkoj ispravnosti uređaja.

#### **4.3.7 Priprema spoja za zavarivanje**

Oblik pripreme spoja za zavarivanje definiran je u uputama za zavarivanje (WPS). Priprema krajeva za zavarivanje može se izvoditi strojnom obradom ili brušenjem. Krajevi elemenata koji se spajaju ne smiju imati zareza, pukotine ili diskontinuitete koji mogu otežati zavarivanje i time utjecati na kvalitetu zavarenog spoja. Krajevi koji se zavaruju moraju neposredno prije zavarivanja biti potpuno suhi, odmašćeni, i čisti od svih nečistoća (boje, ulja, masti, oksidi, zemlja). Rubove treba vizualno pregledati osoba odgovorna za zavarivanje prije sastavljanja u spoj.

Ukoliko se krajevi koji se spajaju međusobno pozicioniraju i fiksiraju pripojima, treba ih raspodijeliti ravnomjerno, a pripajanje može izvesti samo atestirani zavarivač. Pripoje treba izvesti istim dodatnim materijalom i postupkom kao i za korijen spoja. Pripojni zavari će se pretaliti zavarivanjem.

#### **4.3.8 WPS lista**

Modul za izradu PQR/WPAR i SPZ/WPS procedura čine je centralni modul koji je po potrebi povezan sa ostalim modulima i on je najznačajniji dio informacijskog sustava čije je izlaz PQR procedura (nakon verifikacije) i pojedinačni WPS dokumenti. Zbog toga će se u nastavku ukratko pojasniti problematika izrade ovih dokumenata. [6]

Sam izgled dokumenta SPZ/WPS nije propisan, ali su propisani elemenati koje treba sadržavati SPZ/WPS dokument, bilo da se radi o primjeni ASME ili HRN EN propisa u zavarivanju. [6]

Jednom izrađen SPZ/WPS dokument, temeljem nadređenog PQR/WPAR dokumenta ima neograničeno važenje uz uvjet da su uvjeti pod kojima je izrađen temeljni dokument PQR/WPAR ne promjenjeni. PQR/WPAR dokument se često puta naziva i atest postupka koji je izveden pod točno određenim i registriranim uvjetima (točno se znaju parametri zavarivanja, položaj i postupak zavarivanja, vrsta osnovnog i dodatnog materijala, temperatura predgrijavanja, međuprolaz i dogrijavanja i drugi podaci vezano uz tehnologiju i uvjete zavarivanja). Pod točno poznatim uvjetima došlo se do određenih pokazatelja u pogledu kvalitete zavarenih spojeva (kontrola zavarenog spoja metodama kontrole bez razaranja, mehanička svojstva zavarenog spoja, metalografska ispitivanja strukture zavarenog spoja i dr.) i oni su sastavni dio PQR/WPAR dokumenta koji je pohranjen u odjelu zavarivanja izvođača zavarivačkih radova, u evidenciji akreditirane institucije koja je izdala taj PQR/WPAR dokument, te kod inspektora koji nadzire izvođenje tih zavarivačkih radova. [6]

Sam SPZ/WPS dokument koji se nalazi neposredno uz radno mjesto i nadohvat ruke zavarivača, poslovođe zavarivanja, inženjera za zavarivačke radove i inspektora za zavarivačke radove, treba imati samo osnovne podatke neophodne za uspješno izvođenje zavarivačkih radova (glavni parametri zavarivanja, temperature predgrijavanja, međuprolaza i dogrijavanja, položaj zavarivanja, osnovni i dodatni materijal, ...), a ostale podatke koji se nalaze u PQR/WPAR dokumentu ne (napr. Izvještaje o različitim ispitivanjima u laboratoriju). U zaglavlju SPZ/WPS dokumenta nalazi se šifrirana oznaka koja upućuje na oznaku PQR/WPAR dokumenta koji se koristio za izradu toga SPZ/WPS dokumenta. U slučaju potrebe, svi se podaci mogu u vrlo kratkom vremenu provjeriti. [6]

SPZ/WPS dokumenti poželjno je da se izrađuju na jednoj stranici radi čisto praktičnih razloga i bolje preglednosti. Kao primjer SPZ/WPS dokumenta, u nastavku se daje prikaz različita rješenja SPZ/WPS dokumenta, gdje se jasno mogu uočiti glavni elementi koje treba sadržavati taj dokument. [6]

#### **4.3.9 Zavarivanje**

Zavarivanje izvode atestirani zavarivači prema atestu postupka i uputi za zavarivanje. Nakon pripreme spoja i pripojnog zavarivanja zavaruje se korijen. Parametri zavarivanja propisani su u WPS-u. Nakon završenog korjenskog sloja zavar se čisti četkom i vizualno kontrolira. Nakon korjenskog prolaza zavaruje se potreban broj popuna. Nakon svakog prolaza se čisti i vizualno kontrolira. Nakon završetka svakog zavara zavarivač mora upisati svoju oznaku pored zavara.

#### **4.3.10 Popravci zavarenog spoja**

Popravci zavarenog spoja izvode se uz nadzor tehnologa zavarivanja. Dozvoljen je samo 1 popravak na istom zavarenom spoju. U slučaju potrebe za ponavljanjem popravaka potrebno je predmetni sloj kompletno odrezati i ponovno napraviti priprema sukladno WPS-u. Popravke zavarenog spoja mogu vršiti samo atestirani zavarivači.

Za popravke zavarenog spoja nije potrebna dodatna atestna dokumentacija postupka popravka, ali grešku treba odstraniti na takav način da se postigne priprema spoja koja će omogućiti kvalitetan popravak. Pri tome treba nastojati postići oblik pripreme što sličniji temeljnom obliku pripreme spoja za zavarivanje.

Odstranjenje greške u zavarenom spoju vrši se brusilicom, reznom ili brusnom pločom, te mehaničkim postupcima (roto glodalima). Popravljenja mjesta potrebno je ispitati istim metodama kojima je ispitan i osnovni zavar.

#### **4.4 Obrada podnica**

Ovisno o zahtjevima naručitelja vrši se površinska obrada podnica (ručna i strojna). Podnice se naručuju od proizvođača koji imaju mogućnost izdavanja atesta za proizvodnju opreme pod tlakom.

Podaci o površinskoj obradi unutarnje i vanjske strane plašta i podnica uglavnom je navedena u tablici na nacrtu. Za procjenjivanje površine u strojarskoj praksi najčešće se upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$ . U ovom projektu potrebno je obraditi svu površinu u doticaju sa medijem  $R_a < 0,4 \mu\text{m}$ . Vanjsku površinu plašta i ostalih dijelova potrebno je obrusiti na  $R_a < 1,2 \mu\text{m}$



Slika 22. Obrada podnica

#### 4.5 Izrada unutarnjeg plašta

Plašt je promjera 750 mm, ukupne visine 1716 mm i debljine 5 mm. Plašt se izrađuje postupkom kružnog savijanja. Alatni stroj ima 3 paralelno postavljena valjka za valjanje cilindričnih (valjkastih) plašteva. Dva donja valjka su pogonska i služe kao oslonac, dok je treći valjak mako veći, te nema svoj pogon. Osim rotacije, veliki valjak se može okomito pomicati i time odrediti polumjer savijanja lima. Pogon je mehanički, odnosno okretni moment se s elektromotornog pogona prenosi na spojku, zatim na prigon kojim se podešava brzina i smjer rotacije, te na pogonske valjke. Okomito pomicanje većeg valjka može se ostvariti mehanički (navojnim

vretenom i maticom kod konstruktivno jednostavnijih strojeva) ili hidraulički (kod većih strojeva koji zahtijevaju postizanje većih sila savijanja). Kod standardnih alatnih strojeva za valjanje cilindričnih plašteva, duljina valjaka ne prelazi 4 metra. Promjeri valjaka se mijenjaju prema debljini lima, koji se savija, te polumjeru na koji se lim savija. Iako su valjci paralelni, postoje i modeli strojeva kod kojih se pogonski valjci mogu vodoravno razmaknuti s jedne strane alatnog stroja u svrhu dobivanja cilindrično zaobljenja proizvoda. Neki sustavi s 3 valjka mogu tako približiti valjke da mogu raditi i predsavijanje.



Slika 23. Valjci za savijanje limova

## 4.6 Zavarivanje unutarnjeg plašta

### 4.6.1 Plazma zavarivanje

Uzdužno spajanje plašta izvodi se pomoću automatiziranog plazma zavarivanja. Plazma zavarivanje je postupak zavarivanja koje je razvijeno iz TIG postupka zavarivanja.



Slika 24. Automatizirani sustav za automatsko uzdužno zavarivanje u pogonu tvrtke Tomo Varga d.o.o.

Kod plazma zavarivanja se koristi netaljiva volfram elektroda kao i kod TIG zavarivanja. Netaljiva volfram elektroda upuštena je u sapnicu, a plin pod tlakom izlazi kroz donji otvor na sapnici.

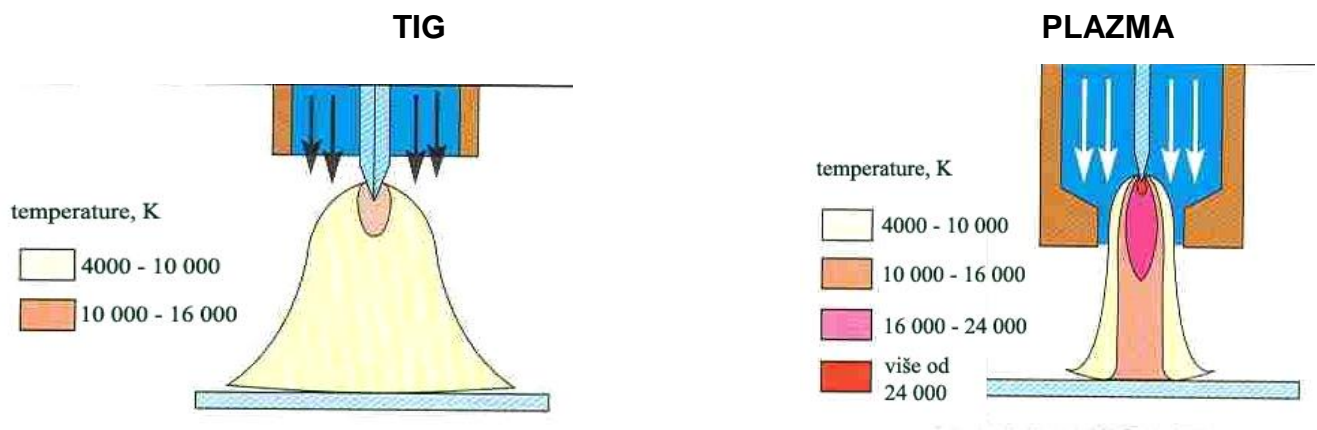
Postoje tri vrste luka koji generiraju plazmu:

- plazma zavarivanje s prenesenim lukom,
- plazma zavarivanje s neprenesenim lukom,
- plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom.

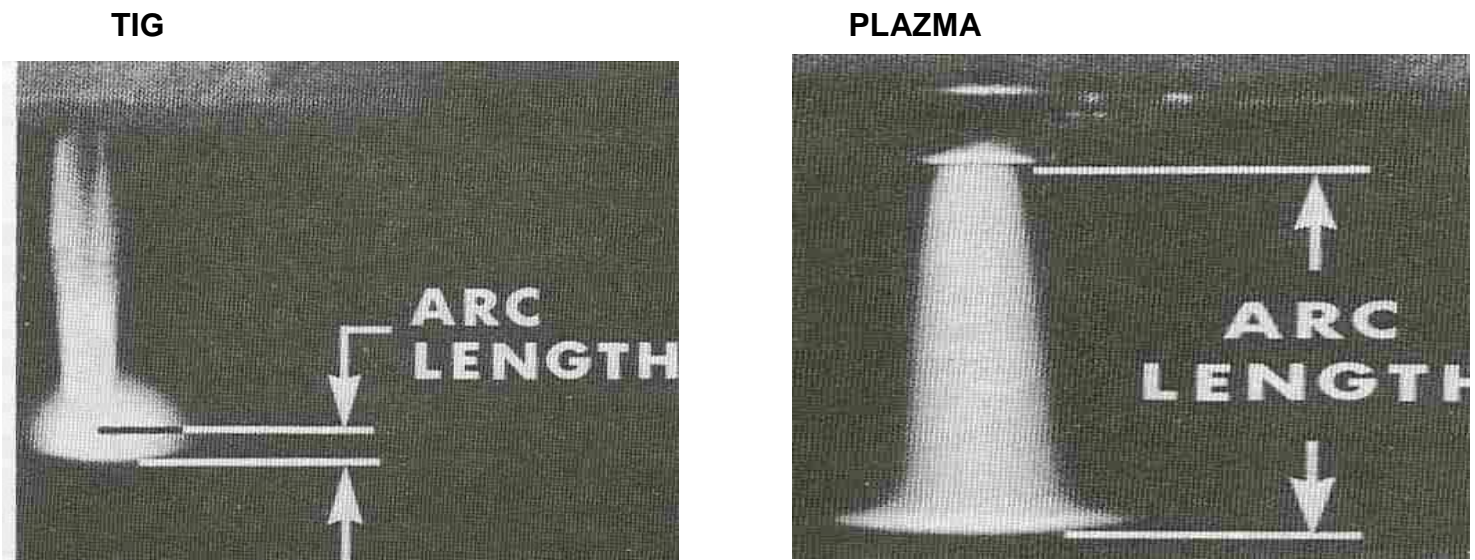
Osnovne prednosti postupka zavarivanja plazmom s efektom ključanice u odnosu na TIG postupak zavarivanja su:



- plazmeni plinovi koji struje nad otvorenom ključanicom pomažu u uklanjanju plinova koji bi pod drugim okolnostima bili zarobljeni u rastaljenom metalu i uzrokovali poroznost,
- simetrična zona linije staljivanja zavarenog spoja umanjuje sklonost poprečnim deformacijama,
- veća dubina penetracije omogućuje smanjenje broja slojeva – vrlo često zavareni spoj može se izvesti u jednom prolazu,
- najčešće se koriste sučeljeni spojevi što znatno umanjuje troškove pripreme spoja.

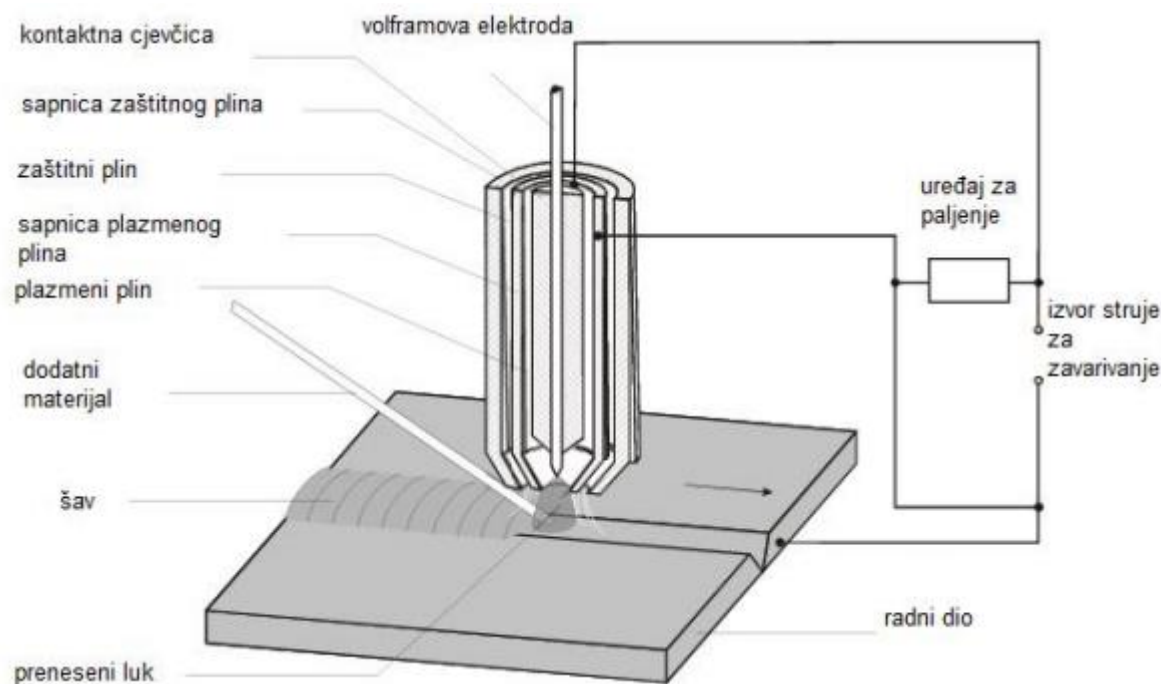


Slika 25. Usporedba širine električnog luka



Slika 26. Usporedba duljine el. luka (10A)

U eksperimentalnom dijelu opisan je postupak plazma zavarivanja s prenesenim lukom. Kod prenesenog luka, električni luk se uspostavlja između volframove elektrode koja je na negativnom polu i radnog komada koji je na plus polu. Tako je radni komad dio strujnog kruga te se toplina potrebna za taljenje dobiva preko anodne mrlje i preko plazmenog mlaza. Prednosti prenesenog luka su u većoj prenesenoj energiji na radni komad i onaj tip se koristi najčešće za zavarivanje. Ovaj tip omogućuje zavarivanje protaljivanjem. [12]



Slika 27. Plazma zavarivanje s prenesenim lukom [12]

#### 4.6.2 Parametri za plazma zavarivanje

Nakon savijanje plašta, potrebno je na nekoliko mjesta uzdužno zavariti plašt. Nakon što se plašt spoji sa minimalno mogućim razmakom između stranica limova, potrebno je odrediti parameter za izradu uzdužnog zavora. Djelatnik koji je obučen za rad na stroju dobiva potrebne parametre za zavarivanje na WPS dokumentu od strane tehnologa zavarivanja koji ima potrebno znanje i iskustvo za određivanje parametra.

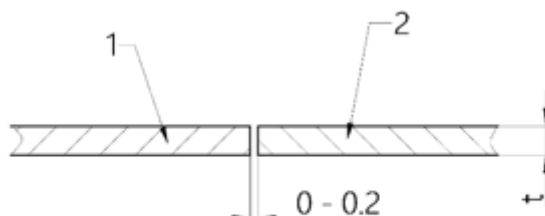




Slika 28. Priprema plašta za izradu uzdužnog zavora

Tablica 12. Parametri plazma zavarivanja [14]

Broj prolaza Run No.	Slijed zav. Welding order	Postupak Procedure HRN EN 4063	Položaj zav. W. position HRN EN 6947	Dotatni materijal Filler material HRN EN 14343-A Trgovačka oznaka Trade mark	$\phi$ / brzina Dia. / speed [mm] / [cm/min]	Struja Current [A]	=, ~/ +, -	Napon Voltage [V]	Brzina zav. Travel speed [cm/min]
1	-	153	PA	G 19 12 3 LSi EZ-Mig 316x1.0	1.0 / 221	107-112	(=), (-)	27.8-29.3	21.0
Broj prolaza Run No.	Zaštitni plin Shielding gas HRN EN 14175		Korjeni zaštitni plin Backing gas HRN EN 14175		Plazmeni plin Plasma gas HRN EN 14175		Elektroda Electrode HRN EN 6848:2008		Unos topline Heat input
	Vrsta Art	[l/min]	Vrsta Art	[l/min]	Vrsta Art	[l/min]	Vrsta Art	$\phi$ [mm]	[kJ/mm]
1	R1-ArH-5	1.5	N5-NH-10	30.0	R1-Ar-7	25.0	WT20	4.8	1.0-1.1



Slika 29. Oblik spoja [14]

#### **4.6.3 Zaštitni plin R1-ArH-5**

Zaštitni plin koji se koristi je proizvod Inoxline H5. Inoxline H5 je mješavina 95% argona i 5% dušika. Zaštitni plin utječe na bolji izgled zavara, nema površinske oksidacije. Električni luk je uži i ima veću energiju te omogućava veće brzine zavarivanja. Protok navedenog plina određen je prema potrošnji l/min.

#### **4.6.4 Korijeni zaštitni plin N5-NH-10**

Korijeni zaštitni plin koristi se kao mješavina vodika i dušik. Takva mješavina zove se formir plin, a postupak korištenja plina formiranje. Unutarnji formir plin se zahtjeva za nehrđajuće čelike i neferitne cjevne sustave (osim aluminija) ako se želi postići glatka površina korijena. Ugljični čelici i nisko legirani čelici koji sadrže manje od 5% kroma mogu se zavarivati sa otvorenim žlijebom korijena bez upotrebe formir plina. Međutim, formiranje spojeva je jako preporučljivo kad sadržaj kroma u metalu zavara prelazi 2% ili kod korištenja umetka pošto formiranje smanjuje pojavu grešaka i preveliku oksidaciju nastajude korijene gusjenice. Inertni formir plin treba se uvijek koristiti za umetke od svih materijala osim kod ugljičnih čelika i kod korištenja umetaka tipa 1 ili 2. Treba napomenuti da će formiranje znatno ubrzati brzinu zavarivanja kad se koristi kod čelika koji obično ne zahtijevaju formiranje, poput ugljičnih i nisko legiranih čelika. [11]

#### **4.6.5 Plazmeni plin R1-ArH-7**

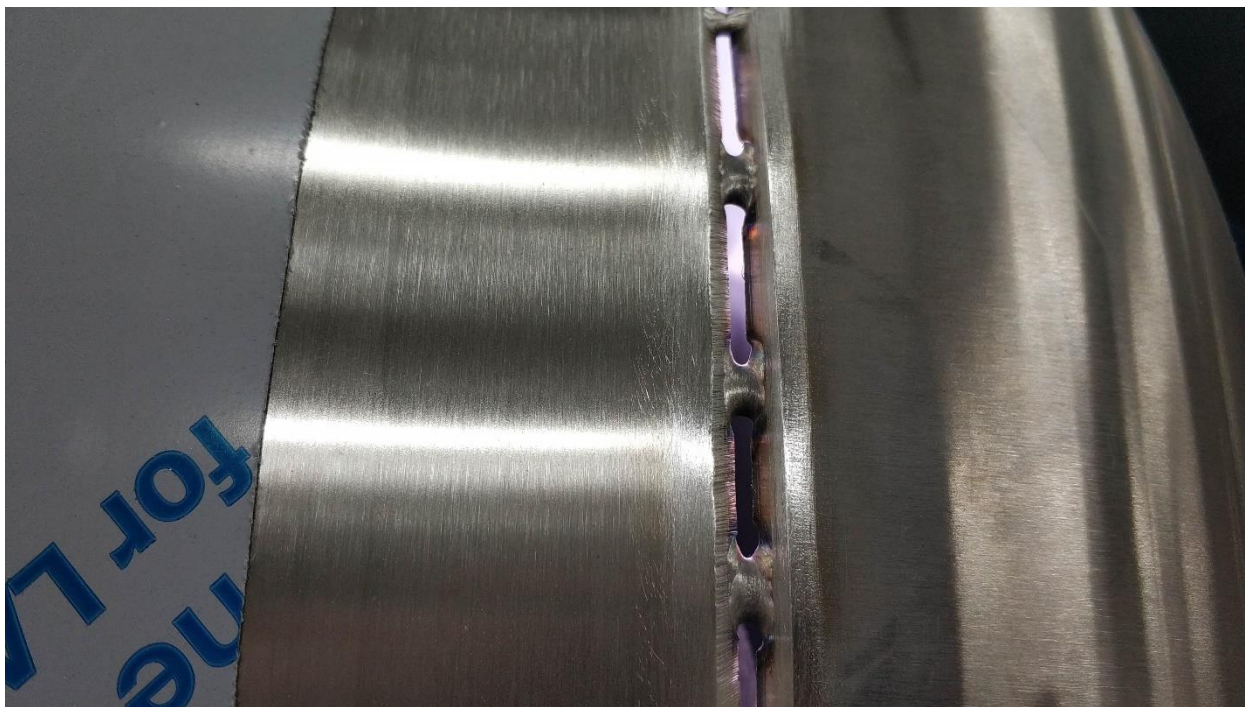
Plazmeni plin je mješavina 95% argona i 7% dušika. Mješavina koja se koristi je proizvod Inoxline H7. Plazmeni plin se koristi za generiranje tj. stvaranje plazmenog luka.

#### **4.6.6 Dodatni materijal za plazma zavarivanje**

Kao dodatni materijal koristi se žica naziva EZ - MIG 316 LSi oznake G 19 12 3 L Si (HRN EN ISO) promjera 1,0 mm. Austenitna nehrđajuća puna žica za zavarivanje istovrsnih i sličnih (stabiliziranih i nestabiliziranih) 17/12/2 CrNiMo čelika. Nizak sadržaj ugljika osigurava postojanost na interkristalnu koroziju, a povišeni sadržaj silicija poboljšava zavarivačka svojstva. [10]

#### 4.7 Spajanje plašta podnicama

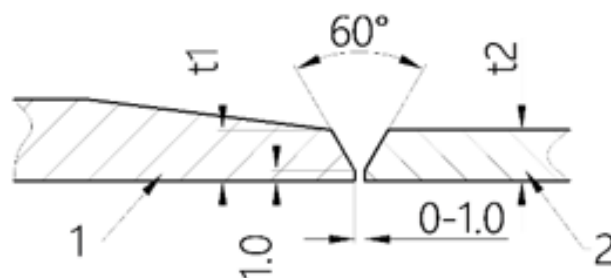
Nakon izrade plašta, potrebno je obrusiti zavar sa unutarnje i vanjske strane plašta. Obradena podnice se spajaju na plašt te je iste potrebno orbitalno zavariti. Izrada orbitalnog zavara zavaruje zavarivač.



Slika 30. Spoj plašta i podnice

##### **4.7.1 Parametri TIG zavarivanje podnica i plašta**

Za svaki zavar na posudi potrebno je izraditi zasebnu WPS listu. Za svaki zavar potrebna je drugačija priprema spoja, broj prolaza, jačina struje. Za izradu zavara pomoću TIG postupka koristi se plin Argon, a za korijeni zaštitni plin koristi se plin formir.



Slika 31. Oblik spoja [14]

Tablica 13. Tablica parametra TIG zavarivanja [14]

Broj prolaza Run No.	Zaštitni plin <i>Shielding gas</i> HRN EN 14175		Korjeni zaštitni plin <i>Backing gas</i> HRN EN 14175		Sekundarni zaštitni plin <i>Trailing gas</i>		Elektroda <i>Electrode</i> HRN EN 6848:2008		Unos topline <i>Heat input</i>	Ostale informacije <i>Other information</i>	Nap. Remark No.
	Vrsta <i>Art</i>	[l/min]	Vrsta <i>Art</i>	[l/min]	Vrsta <i>Art</i>	[l/min]	Vrsta <i>Art</i>	φ [mm]	[kJ/mm]		
1	I1-Ar	12 - 15	N5-NH-10	8 - 12	-	-	WT20	2.4			
2 - n	I1-Ar	12 - 15	-	-	-	-	WT20	2.4			

Broj prolaza Run No.	Slijed zav. <i>Welding order</i>	Postupak Procedure HRN EN 4063	Položaj zav. W. position HRN EN 6947	Dotatni materijal <i>Filler material</i> HRN EN 14343-A	Promjer <i>Diameter</i> [mm]	Struja <i>Current</i> [A]	=, ~/ +, -	Napon <i>Voltage</i> [V]	Brzina zav. <i>Travel speed</i> [cm/min]	Širina njihanja <i>Oscillation</i> max. [mm]
				Trgovačka oznaka <i>Trade mark</i>						
1		141	PA, PC, PH	W 19 12 3 LSi Cromatig 316Lsi	1.6 – 2.0	60 – 75	(=), (-)	9.5 – 10.5	4 – 6	5
2 - n		141	PA, PC, PH	W 19 12 3 LSi Cromatig 316Lsi	1.6 – 2.0	90 – 100	(=), (-)	10 – 11.5	4 – 6	8

Prva faza je izrada korijenskog zavara. Zavarivač koji ima valjani atest sa vanje strane spremnika zavaruje spoj plašta i podnice. U tom trenutku drugi djelatnik se nalazi sa unutarnje strane posude, prati smjer zavara pridržavajući formir. Na taj način se odrađuje prvi prolaz odnosno korijenski zavar.



Slika 32. Izrada korijenskog zavara



Druga faza je popuna žlijeba. Kao što se vidi u tablici 13 parametri su slični kao i kod korijenskog zavora. U drugoj fazi se koristi samo plin argon.



Slika 33. Zavar popuna žlijeba

Treća faza i zadnji prolaz je pokrivni zavar. Parametri su isti kao kod drugog prolaza. Sa trećim prolazom završava zavarivanje podnice i plašta. Potpuno isti postupak je sa drugom podnicom.



Slika 34. Pokrivni zavar

## 4.8 Zavarivanje priključaka

Spremnik sadrži ukupno 10 procesnih priključaka različitih veličina. Priključci na spremniku služe za dovod i odvod medija, temperaturne sonde, nivo sonde i dr. Za svaki priključak potrebna je zasebna WPS lista.



Slika 35. Zavarivanje priključaka

## 4.9 Kontrola zavarenih spojeva

### 4.9.1 Vizualna kontrola zavarenih spojeva

Vizualna kontrola zavora je jedna od najvažnijih faktora u izradi zavarenog spoja. Certificirana i educirana osoba obavlja vizualnu kontrolu zavarenih spojeva prema određenoj proceduri. Vizualnom kontrolom se mogu otkriti neke površinske pogreške kao što su: veće pukotine, neprovaren korijen, površinske poroznosti te nepravilnosti oblika lica i korijena zavora. Metoda vizualna kontrola je jedina metoda koja može uočiti, predvidjeti uzrok i mjesto nastajanja pogreške. Ta metoda kontrole relativno je jeftina, ne oduzima puno vremena, a može dati vrlo korisne informacije kako o kvaliteti zavarenih spojeva, tako i o potrebi kontrole nekom drugom metodom.

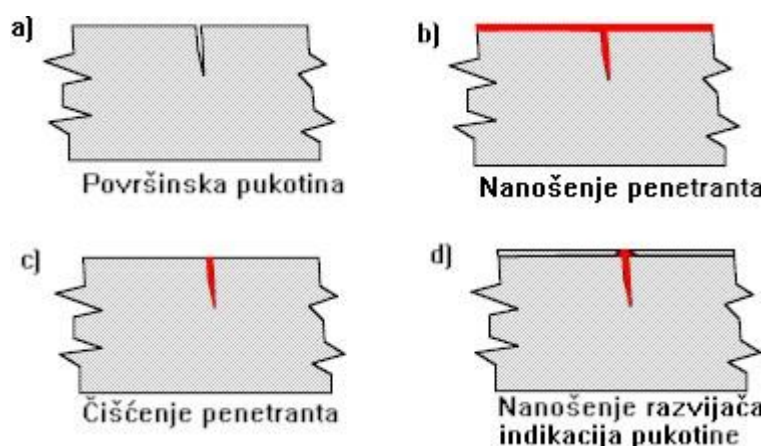
#### **4.9.2 Nerazorna metoda ispitivanja materijala**

NDT predstavlja skup metoda temeljen na principima fizike sa svrhom utvrđivanja svojstava materijala ili komponenata sustava, te otkrivanja različitih vrsta grešaka (defekata), a da se pritom ne utječe na funkcionalnost materijala koji se ispituje (ispitivani materijal ostaje neoštećen). Osnovna svrha ispitivanja bez razaranja je utvrđivanje kvalitete i usklađenosti osnovnog materijala i zavarenih spojeva sa zahtjevima tehničkih specifikacija i standarda. Ispitivanja se većinom izvode na terenu. [7]

##### **4.9.2.1 Kontrola penetrantima**

Na prethodno očišćenu i odmašćenu površinu naosi se penetrant (obično crvene boje). Nakon penetriranja u eventualnu pukotinu (vrijeme penetriranja, tj. prodiranja u pukotine ovisi o vrsti penetranta i o dimenzijama pukotine, ali se približno uzima 10 do 15 minuta), odstranjuje se penetrant na odgovarajući način (vodom, suhom krpom). Kod penetranta koji se odstranjuju vodom treba biti pažljiv i mlaz vode usmjeriti paralelno sa površinom lima, kako mlaz vode ne bi istisnuo penetrant iz pukotine. Nakon sušenja površine lima (suha krpa) nanosi se razvijač (obično je bijele boje), koji izvlači penetrant iz pukotine, pa je na bijeloj površini lima lako uočljiva crvena linija od penetranta iz pukotine. Kod tanjih limova na jednu se stranu nanosi penetrant, a na drugu razvijač. Ukoliko postoji pukotina kroz cijelu debljinu lima, tada će razvijač izvući penetrant na svoju stranu, što će se detektirati kao lako uočljiva crvena linija od penetranta iz pukotine na bijeloj (od razvijača) površini lima.

Ovom je metodom moguća detekcija pukotine, ali ne i dimenzije i ostale karakteristike pukotine. Kontrola tekućim penetrantima ne primjenjuje se kod zavarenih spojeva zavarenih proizvoda za prehrambenu industriju, kao ni kod zavarenih spojeva gdje postoji sklonost prema koroziji (posebno koroziji uz naprezanje). [8]



Slika 36. Shematski prikaz kontrole penetrantima

#### 4.9.2.2. Radiografska kontrola

Radiografija je metoda nerazornih ispitivanja dijelova i sklopova koja se temelji na razlikama u apsorpciji zračenja dijela ili cijelog komada koji se ispituje. Količina zračenja koje će predmet apsorbirati ovisi o apsorpcijskim karakteristikama samog materijala, kao i gustoći i debljini istog. Zračenje koje materijal ne upije odnosno apsorbira koristi se za izradu zapisa na filmu ili fotosenzitivnom papiru ili se može detektirati odnosno prikazati pomoću različitih uređaja. Konvencionalna radiografska metoda podrazumijeva zapisivanje trajne slike na filmu ili papiru (xeroradiografija, eng. xeroradiography), iako bi se u pravilu trebala odnositi na sve poznate radiografske metode kontrole. U radu se naglasak stavlja upravo na zapis na filmu.

U odnosu na druge NDT metode (npr. ispitivanje magnetskim česticama, penetrantima ili vrtložnim strujama), radiografija ima tri osnovne prednosti:

- sposobnost detekcije volumnih nepravilnosti,
- sposobnost uočavanja značajnijih varijacija u sastavu materijala,
- stvaranje trajnog zapisa.

Radiografska metoda ispitivanja intenzivno se koristi kod ispitivanja zavarenih spojeva, kao i odljevaka poglavito onih kod kojih nije dozvoljeno postojanje volumnih nepravilnosti. Primjer toga je čest zahtjev za radiografsko ispitivanje debelostijenih odljevaka i zavarenih spojeva posuda pod tlakom. [9]



#### 4.10. Tlačna proba

S obzirom da spremnik koji je analiziran u ovome radu spada u tlačnu opremu potrebna je i završna tlačna proba. Zbog svoje specifičnosti te opasnosti po ljude tlačna oprema je propisana zakonskim propisima. Svaki proizvođač tlačne opreme dužan je strogo pridržavati se pravilnika o pregledima i ispitivanju opreme pod tlakom.



Slika 37. Priprema spremnika za tlačnu probu

Na tehničkom nacrtu određen je tlak na temelju kojeg se obavlja tlačna proba. Tlačna proba se odrađuje na način da se spremnik napuni vodom te se ručnom pumpom stvara tlak koji u ovom slučaju iznosi 6.6 bar. Sve priključke potrebno je zatvoriti. Manometar se postavlja na totalni ispuh i na priključak na gornjem poklopcu spremnika. Određeno

vrijeme spremnik ostane pod tlakom te se na taj način kontrolira da li ima pada tlaka u spremniku odnosno da li je tlačna proba uspješno završena.



Slika 38. Prikaz manometra na totalnom ispustu

## 5. Zaključak

Razvitak i proizvodnja korozijski postojanih Cr-Ni čelika tijekom 20. stoljeća omogućili su mnogim kompleksnim granama industrije daljnji razvitak i usavršavanje postojećih postupaka proizvodnje kao i razvijanje novih postupaka i tehnologija koji su bili ograničeni upravo nepostojanjem odgovarajućih materijala koji bi posjedovali povišena svojstva korozijske otpornosti uz istovremeno dobra mehanička svojstva i svojstva zavarljivosti. Nehrdajući čelik zbog svojih svojstava pokazao se kao nezaobilazan materijal u proizvodnji strojeva i opreme u prehrambenoj industriji.

Za izradu spremnika korištena su dva postupka zavarivanja, TIG postupak i plazma zavarivanje. Postupak plazma zavarivanja koristio se za izradu uzdužnog zavara, dok se TIG postupak ručnog zavarivanja koristio za izradu zavara podnica i ostalih priključaka na spremniku.

Unatoč sve zastupljenijoj automatizaciji u proizvodnji TIG postupak nije pogodan za automatizaciju, robotizaciju ni poluautomatizaciju u proizvodnji koja nije serijska. Zaključak navedenog je da u tvrtkama koje proizvode specifične proizvode u pojedinačnim komadima i koji se razlikuju ovisno o potrebama kupca, postupak ručnog TIG zavarivanja je i dalje nezamjenjiv, sa ekonomskog aspekta neisplativ.

## 6. Literatura

- [1] Nihad Crnalić (2005). Postupci zavarivanja i njihov utjecaj na kvalitetu i troškove u proizvodnji. Rad izložen na seminaru.
- [2] Reda, V (2017). Nehrdajući čelici. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu
- [3] Kožuh, S (2010). Specijalni čelici. Sisak: Metalurški fakultet Sveučilište u Zagrebu
- [4] Horvat M, Kondić V, Brezovečki D. (2014). Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja.
- [5] Samardžić I, Bogovac D, Jorgić T, Kovačić K. (2015). Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija.
- [6] SPZ /WPS procedure – dokumenti. Preuzeto s:  
<http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar1/files/IP%202005%20-%20PDF/4.pdf>
- [7] Kontrola bez razaranja. Preuzeto s:  
<http://www.croatiainspect.hr/index.php/croatiainspect-o-nama/croatiainspect-sektori/tehnicki-sektor/odjel-kontrole-bez-razaranja-i-opreme-pod-tlakom-kbr-i-opt?showall=&start=1>
- [8] Kontrola kvalitete nakon zavarivanja. Preuzeto s:  
[http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/kbr\\_met.html](http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/kbr_met.html)
- [9] Bruno Breka (2017). Diplomski rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [10] Specifikacija žice EZ – MIG 316 LSi.  
Preuzeto s: <https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZMIG316.html>
- [11] Smjernice za formiranje i korijeno zavarivanje cijevi. Preuzeto s:  
<http://www.welding.com.hr/WE/SMJERNICE%20ZA%20FORMIRANJE%20I%20KORIJENO%20ZAVARIVANJE%20CIJEVI.pdf>
- [12] Domagoj Delač (2014). Završni rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [13] Zavarivanje TIG postupkom. Preuzeto s:  
<http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>
- [14] Interni dokumenti, Tomo Varga d.o.o.